



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Titulació:

Màster Universitari en Enginyeria Industrial (MUEI)

Escola:

Escola Superior d'Enginyeria Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Alumne:

Virginia Dolores Mendizábal Dinucci

Títol Treball Final de Màster:

ESTUDI EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓ ENTRE PLAQUES DE FRP I
FORMIGÓ EN ESTRUCTURES HÍBRIDES

Director:

Ernest Bernat Maso

Convocatòria de lliurament del TFM:

Ordinària; Quadrimestre de primavera 2018-2019

Data d'entrega:

20 de Juny del 2019

Contingut:

DOCUMENT 1. MEMÒRIA

Treball Final de Màster

ESTUDI EXPERIMENTAL DE LA INTERACCIÓ ENTRE PLAQUES DE FRP I FORMIGÓ EN ESTRUCTURES HÍBRIDES

Memòria

Autor: **Virginia Dolores Mendizábal Dinucci**

Director: **Ernest Bernat Maso**

MUEI Q2 2018-2019

Agraïments

Primer de tot m'agradaria agrair a totes les persones que han contribuït a fer que aquest treball pogués ser realitzat.

A la meva família, tant la que està a prop com la que està lluny, per donar-me sempre suport, sobretot en moments difícils. I moltíssimes gràcies a la meva mare, que sempre està disposada a fer un esforç per ajudar-me sempre que ho necessito.

Als amics que he anat coneixent al llarg del grau i del màster, que entenen pel que estàs passant i donen suport sempre.

Al meu professor i director Ernest Bernat, per donar-me l'oportunitat d'agafar un projecte d'aquesta envergadura, podent experimentar al laboratori i veure com s'anava millorant la feina de mica en mica.

També agrair la col·laboració del professor Lluís Gil en resoldre tots els dubtes sobre resistència de materials que m'han anat sorgint al llarg de l'estudi.

Gràcies a totes les persones que he conegut al LITEM, amb les que he passat tantes hores al laboratori i fora, i de les que he après molt.

Finalment et dono les gràcies a tu lector, per aturar-te una estoneta a llegir el resultat del què ha estat una experiència fantàstica.

Abstract

This study seeks to characterise the interaction of the different elements of hybrid structures at a mechanical-resistant level, focusing on the composite material Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) and concrete.

A study is made of the behaviour of concrete with a CFRP plate, where the CFRP plate is placed to study it as a structural reinforcement material, studying different cases of adherence elements found on the surface of the CFRP.

The specimens are subjected to shear and bending efforts to determine which nexus elements improve the properties and which is the change in the behaviour of the structure.

An attempt is made to approximate the initial behaviour of the hybrid structure to bending by means of the homogenization theorem and at the maximum load point by means of an assumption of stress distribution.

Once the nexus elements that give the best performance have been determined, a prototype of a water tank is manufactured to check the possible industrialisation of the technology.

Resum

Aquest estudi busca estudiar la interacció dels diferents elements de les estructures híbrides a un nivell mecànic-resistent, enfocant-se en el material compost de *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) i formigó.

Es fa un estudi del comportament del formigó amb una xapa de CFRP, on la xapa de CFRP es col·locada per l'estudi com a material de reforç estructural, estudiant diferents casos d'elements d'adherència que es troben sobre la superfície del CFRP.

Es documenta el procés complet de fabricació i condicionament dels espèimens a assajar, tenint en tot moment en compte les mesures de seguretat necessàries per a la realització de cada tasca.

Es sotmeten els espèimens a esforços de tallant i de flexió per determinar quin elements de nexa milloren les seves propietats i quin es el canvi en el comportament de l'estructura.

S'intenta aproximar el comportament inicial de l'estructura híbrida a flexió mitjançant el teorema de l'homogeneïtzació i al punt de trencament mitjançant una suposició de la distribució d'esforços.

Un cop determinats els elements de nexa que donen millors propietats, es duu a terme la fabricació d'un prototip de dipòsit d'aigua per comprovar la possible industrialització de la tecnologia.

Resumen

Este estudio busca estudiar la interacción de los diferentes elementos de las estructuras híbridas a un nivel mecánico-resistente, enfocándose en el material compuesto de CFRP y hormigón.

Se hace un estudio del comportamiento del hormigón con una chapa de CFRP, donde la chapa de CFRP se coloca para estudiarla como un material de refuerzo estructural, estudiando diferentes casos de elementos de adherencia que se encuentran sobre la superficie del CFRP.

Se someten los especímenes a esfuerzos de cortante y de flexión para determinar que elementos de nexo mejoran las propiedades y cuál es el cambio en el comportamiento de la estructura.

Se intenta aproximar el comportamiento inicial de la estructura híbrida a flexión mediante el teorema de la homogeneización i en el punto de carga máxima mediante una suposición de la distribución de esfuerzos.

Una vez determinados los elementos de nexo que dan mejores prestaciones, se lleva a cabo la fabricación de un prototipo de depósito de agua para comprobar la posible industrialización de la tecnología.

Declaració d'honor

Declaro que,

el treball d'aquest Treball Final de Màster ha estat dut a terme completament per la meva persona,

cap part d'aquest Treball Final de Màster ha estat extreta d'una obra o treball d'una altra persona, sense donar-li el crèdit,

totes les referències han estat correctament citades,

estic autoritzada a fer ús de la informació relacionada amb el grup de recerca que proporciono a aquest document.

Entenc que una infracció a aquesta declaració em deixa subjecte a les accions disciplinàries previstes per la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTECH.

Virginia Dolores

Mendizábal Dinucci

Juny 2019

Nom de l'estudiant

Signatura

Data

Títol del Treball: Estudi experimental de la interacció entre plaques de FRP i formigó en estructures híbrides

Taula de contingut

1.	Introducció	12
1.2.	Objectiu	12
1.1.	Abast	12
1.2.	Justificació	13
1.3.	Planificació	13
1.4.	Estructura del projecte	14
2.	Estat de l'art.....	15
2.1.	Estructures mixtes	15
2.2.	Reforç estructural del formigó amb fibra de carboni	20
2.3.	Assaig de rasant a estructures híbrides	25
2.4.	Assaig de flexió a estructures híbrides.....	26
3.	Selecció dels casos a estudiar i la geometria dels espècimens.....	27
3.1.	Selecció dels casos	27
3.2.	Geometria dels espècimens.....	28
4.	Avaluació dels riscos i mesures preventives	29
5.	Procés constructiu	31
5.1.	Materials i equipaments	31
5.2.	Fabricació del compòsit CFRP	33
5.3.	Condicionament del CFRP	36
5.4.	Formigonat	38
6.	Experimentació	42
6.1.	Assaig de resistència a compressió	42
6.2.	Assaig de rasant	45
6.3.	Assaig de flexió.....	47
7.	Resultats i anàlisi	50
7.1.	Resultats de l'assaig de rasant	50
7.1.1.	Cas de CFRP.....	50
7.1.2.	Cas de CFRP amb pedra.....	51
7.1.3.	Cas de CFRP amb pedra i malla.....	52
7.1.4.	Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla.....	53
7.1.5.	Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla inclinada 45°	54
7.2.	Anàlisi dels resultats de l'assaig de rasant.....	55
7.3.	Resultats de l'assaig de flexió	59
7.3.1.	Cas de CFRP amb pedra.....	60
7.3.2.	Cas de CFRP amb pedra i malla.....	62

7.3.3.	Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla.....	64
7.3.4.	Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla inclinada 45°	66
7.4.	Anàlisi dels resultats de l'assaig de flexió	67
7.4.1.	Estudi de la primera linealitat	68
7.4.2.	Punt de màxima càrrega	72
7.4.3.	Anàlisi del comportament de l'estructura en funció dels elements d'adherència. 77	
7.5.	Anàlisi final dels elements d'adherència.....	80
8.	Construcció del prototip	82
9.	Impacte ambiental.....	85
10	. Pressupost	86
11	. Conclusions.....	87
12.	Següents passos.....	89
13.	Bibliografia	90

Índex de figures

Figura 1.	Diagrama de Gantt.....	14
Figura 2.	Primera casa construïda amb formigó armat [3].....	16
Figura 3.	Diferents tipus de seccions d'estructures mixtes amb xapa perfilada [4]	16
Figura 4.	Comparació del trencament d'una biga sense reforç (CB1) i una reforçada amb una placa d'acer (CB2) [9].....	17
Figura 5.	Models a desenvolupar amb el corresponent mallat: Detallat (Esquerra) i Simplificat (Dreta) [10].....	18
Figura 6.	Comparació de l'experimentació real amb models realitzats amb ANSYS [10].....	18
Figura 7.	Imatge d'una proveta de formigó amb dues làmines d'acer a front i al darrere després d'un impacte balístic [11]	19
Figura 8.	Bobina de fibra de carboni	21
Figura 9.	Secció de les bigues de l'estudi de Heffernan i Erki [14]	22
Figura 10.	Configuració de l'assaig de Heffernan i Erki [14]	22
Figura 11.	Resultats experimentals de Heffernan i Erki [14].....	23
Figura 12.	Configuracions d'assaig del treball de Abduljalil B. [15].....	23
Figura 13.	Dimensions de la paret i configuració de l'assaig [15]	24
Figura 14.	Espècimens després de l'assaig de flexió [15]	24
Figura 15.	Tipus d'assaig de rasant amb estructures amb dues làmines de reforçament [16]	25
Figura 16.	Tipus d'assaig de rasant amb estructures amb una làmina de reforçament [16]. 25	
Figura 17.	Assaig de flexió a 4 punts [17].....	26
Figura 18.	Assaig de flexió a 3 punts [18].....	26
Figura 19.	Dimensions dels espècimens de flexió en mm	28
Figura 20.	Dimensions dels espècimens de rasant en mm	28
Figura 21.	Aplicació de la barreja de resina i enduridor.....	34
Figura 22.	Comparació d'acabats de CFRP	35
Figura 23.	Període d'assecat del CFRP	35
Figura 24.	Preparació dels taulons de fusta mitjançant la caladora	38
Figura 25.	Encofrat segellat	39

Figura 26. Zona de preparació del formigó.....	39
Figura 27. Comparació d'acabats del formigó en espèimens amb malla	40
Figura 28. Espèimen de flexió amb serjants per evitar la dilatació central	40
Figura 29. Elements per millorar la compacitat del formigó	40
Figura 30. Posicions de mesura de l'escleròmetre [19]	42
Figura 31. Funcionament de l'escleròmetre [20].....	43
Figura 32. Gràfic que permet traduir la mesura de l'escleròmetre a MPa	43
Figura 33. Equipament de l'assaig de rasant.....	46
Figura 34. Dades de rasant representades sense processament.....	46
Figura 35. Dades de rasant representades amb processament	47
Figura 36. Configuració de l'assaig de flexió	49
Figura 37. Gràfic Força - Desplaçament del cas Res	50
Figura 38. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra.....	51
Figura 39. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Malla.....	52
Figura 40. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla	53
Figura 41. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla 45°.....	54
Figura 42. Gràfic de tallant comparatiu	56
Figura 43. Cas de formigonat sobre CFRP (Res): Espèimen 1 (esquerra), espèimen 2 (Dreta)	57
Figura 44. Separació no homogènia de la pedra del CFRP.....	57
Figura 45. Mètodes de trencament: Trencament de la fibra de vidre (esquerra), despreniment de la làmina de CFRP (dreta)).	58
Figura 46. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra	60
Figura 47. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra 1	61
Figura 48. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra 2	61
Figura 49. Gràfic Força - Desplaçament de l'espèimen Pedra + Malla 1	62
Figura 50. Gràfic Força - Desplaçament de l'espèimen Pedra + Malla 2	62
Figura 51. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Malla 1.....	63
Figura 52. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Malla 2.....	64
Figura 53. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla	64
Figura 54. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Sorra + Malla 1	65
Figura 55. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Sorra + Malla 2	65
Figura 56. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla 45°.....	66
Figura 57. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Sorra + Malla 45° 1	67
Figura 58. Gràfic Moment - Tensió de l'espèimen Pedra + Sorra + Malla 45° 2.....	67
Figura 59. Canvi de pendent a la corba Força - Desplaçament.....	68
Figura 60. Simplificació pel càlcul de la inèrcia	70
Figura 61. Suposició inicial de distribució d'esforços.....	73
Figura 62. Secció amb la qual es fan els càlculs i definició de cota.....	73
Figura 63. Determinació de la deformació màxima del formigó	74
Figura 64. Segona suposició de la distribució d'esforços	75
Figura 65. Significat de "d" a la fórmula de càlcul del moment	76
Figura 66. Comparació del moment calculat i l'experimental.....	77
Figura 67. Comparativa de la força màxima dels casos	78
Figura 68. Disseny del prototip.....	82
Figura 69. Parets del prototip en procés d'assecatment.....	83
Figura 70. Recinte tancat en procés d'assecatment	83
Figura 71. Base formigonada	84

Índex de taules

Taula 1. Comparació de les propietats de la fibra de carboni i l'acer [12]	20
Taula 2. Comparació de la fibra de carboni en teixits i no teixits [13]	21
Taula 3. Riscos i mesures de seguretat amb productes químics i peril·losos	29
Taula 4. Mesures de seguretat per a tasques peril·loses	30
Taula 5. Exemple de càlcul de proporcions de resina i enduridor.....	33
Taula 6. Quantitats de resina per l'addició de pedres.....	36
Taula 7. Quantitat de barreja a preparar per a l'addició de sorra.....	37
Taula 8. Resistència a compressió dels espèimens de rasant.....	44
Taula 9. Resistència a compressió dels espèimens de flexió	44
Taula 10. Comparació dels assaigs de rasant.....	55
Taula 11. Càlcul del tallant mitjà	56
Taula 12. Resum de l'efecte de cada un dels elements d'adherència	59
Taula 13. Punts últims de la linealitat inicial	69
Taula 14. Tensió de tracció del CFRP i tensió de tracció màxima del formigó	69
Taula 15. Comparació del moment experimental i calculat	71
Taula 16. Error entre el valor experimental i el calculat a la vall	71
Taula 17. Càlcul de la força R aplicada.....	74
Taula 18. Càlcul del cap de compressions.....	76
Taula 19. Comparació del moment experimental i el calculat.....	76
Taula 20. Comparació dels assajos de flexió	77
Taula 21. Càlcul de la força mitjana	78
Taula 22. Resum comparatiu de l'efecte dels elements d'adherència	80
Taula 23. Conclusions de l'efecte dels elements d'adherència als 2 assaigs	80
Taula 24. Consum de l'equipament del laboratori	85

1. Introducció

A aquest apartat es farà una breu introducció a la totalitat de l'estudi, així com a les raons principals per les quals s'ha realitzat. A més s'explicarà breument l'estructura dels documents.

1.2. Objectiu

L'objectiu d'aquest estudi és fer un estudi sobre la influència dels materials de nexa entre una làmina de compost de CFRP amb el formigó a una estructura mixta.

Per tal d'assolir aquest objectiu, es plantegen els objectius secundaris següents:

- Fer una recerca sobre l'estat de l'art sobre aquest tipus d'estructures per determinar la millor configuració d'assaig.
- Planificar una campanya experimental per determinar la resistència dels diferents tipus de casos de nexa dels esforços als quals estaria sotmesa l'estructura.
- La fabricació dels espècimens a assajar
- Estudiar el comportament dels espècimens en funció dels elements de nexa.
- Analitzar la informació obtinguda de la campanya experimental per identificar l'efecte de cada tipus de nexa sobre l'estructura.
- Escollir la configuració que millor resposta dona sota els esforços.
- Aplicar els coneixements obtinguts per al disseny i producció d'un prototip de dipòsit d'aigua.

1.1. Abast

L'abast d'aquest estudi inclou els següents punts:

- ✓ Caracterització del formigó.
- ✓ Fabricació dels espècimens a assajar (amb l'excepció de Pedra + Malla 1 a flexió).
- ✓ Mesures de seguretat emprades durant la realització de l'estudi.
- ✓ Disseny dels sistemes d'assaig.
- ✓ Avaluació dels resultats obtinguts dels assajos.
- ✓ Anàlisi i tractament dels resultats
- ✓ Cost associat a la realització de l'estudi
- ✓ Estudi de l'impacte ambiental

Aquest treball no inclou:

- ✗ Perfilació de la làmina d'acer en forma d'*omega shape*.
- ✗ Construcció i experimentació amb l'espècimen Pedra + Malla 1 de flexió.
- ✗ Simulació del comportament estructural pel mètode d'elements finits (FEA).
- ✗ Protocol de tractament de residus.

1.2. Justificació

El formigó és un element molt conegut i utilitzat en el sector de la construcció i l'enginyeria civil. És un material que resisteix molt bé esforços de compressió però que a esforços de tracció té una resistència pràcticament negligible i per aquest motiu cal que tingui un reforçament, normalment d'acer en forma de barra o làmina.

La principal aplicació d'aquest estudi són dipòsits d'aigua per obres civils. Això implica que el hi ha contacte directe o indirecte entre l'aigua i l'acer, de manera que es produeix el fenomen químic de la corrosió, que provoca una disminució de les propietats del material.

Per aquest motiu es busca una nova tecnologia capaç d'aportar resistència a tracció al conjunt format pel material i el formigó i el material seleccionat ha estat la fibra de carboni.

Actualment hi ha molta recerca en relació al reforçament del formigó amb fibra de carboni, i també és conegut el problema d'adherència del formigó a altres superfícies, de manera que aquest estudi pretén donar resposta a quins elements són necessaris per què el formigó tingui una adherència al material de reforç, en aquest cas una làmina de compost de fibra de carboni, que sigui capaç de resistir els esforços estructurals als quals estaria sotmès.

1.3. Planificació

A causa de la magnitud de l'estudi, la fabricació de 18 espècimens més el dipòsit, tenint en compte que es necessiten 4 setmanes de presa i enduriment abans de poder dur a terme els assaigs, ha sigut necessària una planificació des del primer moment.

L'estudi comença el 18 de febrer i finalitza el 20 de juny, hi ha 17 setmanes per dur-ho a terme.

Al diagrama de Gantt de la Figura 1, es reflecteix els temps de dedicació de cadascuna de les tasques a dur a terme.

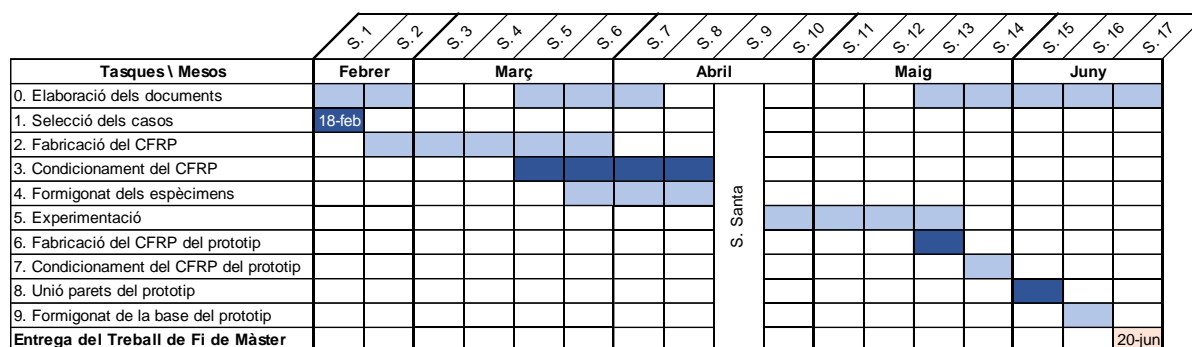


Figura 1. Diagrama de Gantt

1.4. Estructura del projecte

El projecte consta de tres documents:

- La memòria o *report*. El present document engloba tot l'estudi dut a terme, des de la planificació d'aquest, fins a l'anàlisi i les conclusions extretes de l'experimentació
- Al pressupost o *budget*. es desglossa el preu aproximat dels serveis i materials emprats en la realització de l'estudi.
- A l'annex es troba el seguiment de l'experimentació i les fitxes tècniques dels materials principals.

2. Estat de l'art

Aquest apartat dona una petita introducció als diferents materials amb els quals es treballarà, així com una ullada de la recerca en aquest àmbit.

2.1. Estructures mixtes

El formigó és un dels materials més utilitzats a la indústria de la construcció a causa de la seva característica estructural principal, que és la seva bona resistència a esforços de compressió. En canvi, quan és sotmès a altres tipus d'esforços sigui de tracció, flexió o tallant, presenta una resistència molt reduïda, que fa que sigui necessari que tingui un altre element que supleixi la seva mancança.

Per això és comú trobar el formigó combinat amb altres elements, donant lloc a un material compost.

Un material compost consisteix a la combinació a nivell macroscòpic de dos o més components no solubles entre ells, que s'uneixen sinèrgicament, obtenint un material amb una major capacitat estructural que la dels seus constituents quan aquests actuen per separat. [1]

Està format per:

- La matriu: és el component majoritari que actua com aglutinant i protector del reforç, que s'encarrega de transmetre les càrregues a les quals està sotmesa l'estructura.
- El reforç: és el component minoritari, que aporta resistència i rigidesa. Es pot trobar adherit a la matriu en forma de partícules, barres, fibres contínues o discontinúes, en una direcció o diverses direccions i que poden ser llargues o curtes de distribució uniforme o aleatòria. [2]

En el cas d'estructures mixtes amb formigó, aquest és la matriu i pot estar reforçat amb diferents tipus de material.

El material més conegut com a reforç del formigó és l'acer, que va ser utilitzat per primer cop per l'enginyer francès Joseph-Louis Lambot, que va construir una barca que consistia en un bloc de formigó reforçat amb quatre barres d'acer.

Més endavant un altre francès, François Coignet, construeix el primer edifici amb formigó armat al 1853, i publica un llibre descrivint les aplicacions i usos als quals podria estar destinat el formigó armat i aconsegueix la patent del formigó al 1855. [3]



Figura 2. Primera casa construïda amb formigó armat [3]

La història avança i el formigó armat esdevé en un dels elements estructurals més utilitzats al món, amb el desenvolupament de diferents normatives per la seva utilització. Una de les més importants al continent europeu és l'Eurocode 4, desenvolupat l'any 1994 i que és la guia pel disseny de material compòsits amb acer i formigó.

L'acer pot reforçar al formigó de diferents maneres, sigui mitjançant barres o mitjançant xapes perfilades.

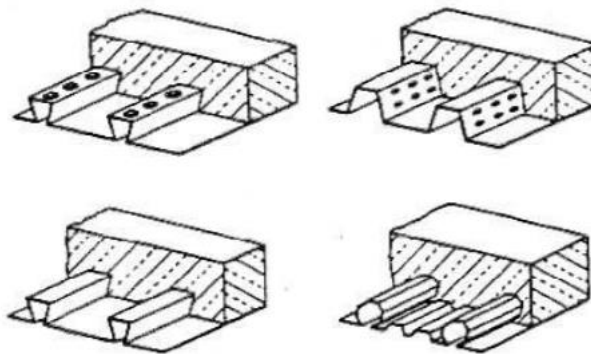


Figura 3. Diferents tipus de seccions d'estructures mixtes amb xapa perfilada [4]

La combinació de làmines d'acer, unides al formigó in situ, dona un material compost de fàcil construcció, lleugeresa i facilitat de posada a l'obra. Per aquest motiu, la seva utilització a la indústria és molt variada. Des de cobertes de naus industrials [5], terres [6] o parets [7] fins al reforçament per ponts a molts països del món com França, Bèlgica o Sud-àfrica [8].

L'ampli camp d'aplicació del formigó reforçat amb plaques d'acer, fa que s'hagi fet recerca en

l'estudi del comportament del compòsit a l'estar sotmès a diferents esforços per poder preveure el seu comportament durant les càrregues que suporta a les seves diverses aplicacions.

L'any 2005, Zhu Y. i Su R.K.L experimenten sotmetent els seus espècimens a càrregues cícliques inverses de flexió mantenint una càrrega a tallant constant. L'acer absorbeix gran part de les càrregues aplicades (contra les quals el formigó té una resistència molt baixa) i dóna certa ductilitat a l'estructura. [9]

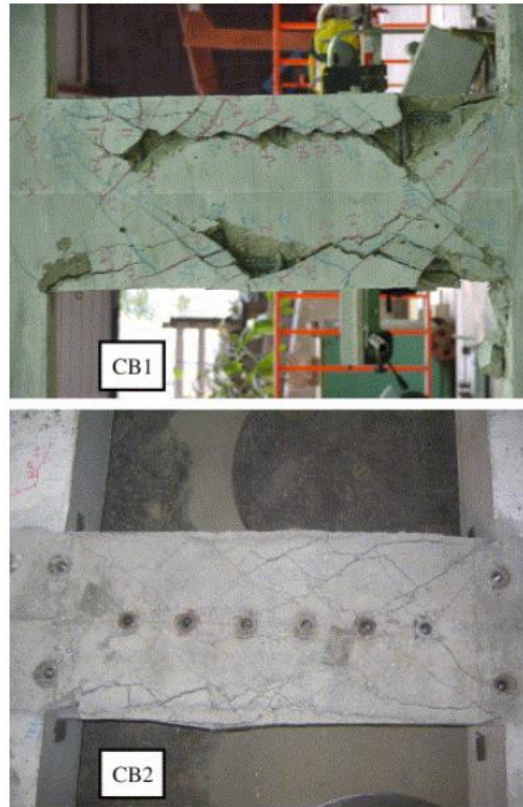


Figura 4. Comparació del trencament d'una biga sense reforç (CB1) i una reforçada amb una placa d'acer (CB2) [9]

També es busca desenvolupar models que puguin simular el comportament que tindrà el material a través de simulacions de les càrregues mitjançant el mètode d'elements finits.

Elmatzoglou M. i Avdelas A. van realitzar la modelització en ANSYS d'una paret de ciment reforçada amb dues plaques d'acer i van comparar el seu model amb altres publicacions on s'experimentava amb la paret sotmesa a esforços de compressió axial i a càrregues de tallant cícliques. [10]

En el cas de la modelització, és molt important tenir en compte les condicions de contorn que es col·loca al model, ja que una petita variació pot afectar considerablement a la resposta.

A l'estudi, es van desenvolupar dos models:

- Detallat: contempla la flexibilitat del terra, per tant dóna una resposta més aproximada.
- Simplificat: negligeix la flexibilitat del terra i pot arribar a portar a una sobreestimació

de la duresa de l'estructura.

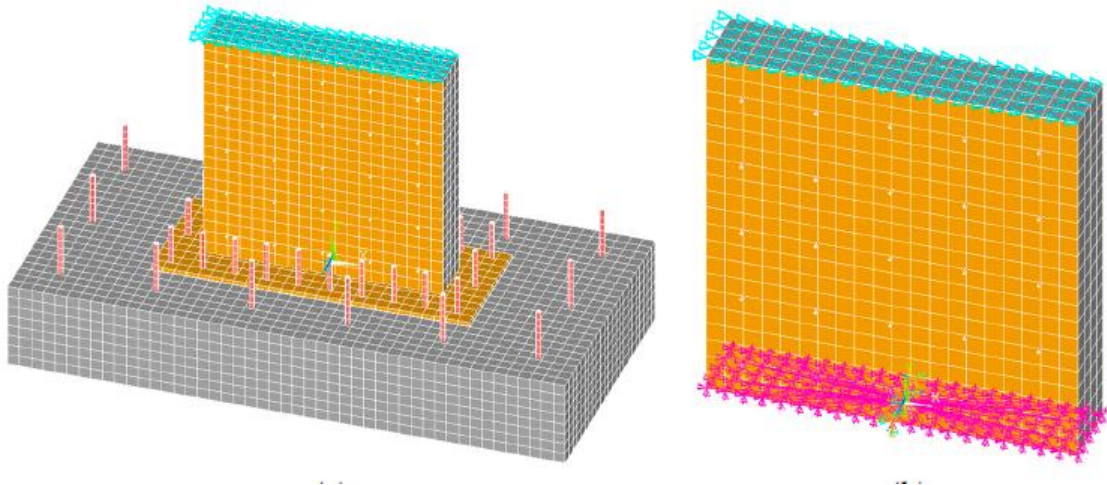


Figura 5. Models a desenvolupar amb el corresponent mallat: Detallat (Esquerra) i Simplificat (Dreta) [10]

Un cop definides totes les condicions de contorn de cadascun dels elements del model, se simulen els esforços de rasant als que es van sotmetre els espècimens i es compara la resposta real amb l'obtinguda al model.

La figura 6 és un exemple de simulació de càrrega de tallant a l'espècimen SC1. La línia vermella discontinua és la que més s'apropa al model real (línia blava) i correspon al model detallat, mentre que la verda correspon al model simplificat.

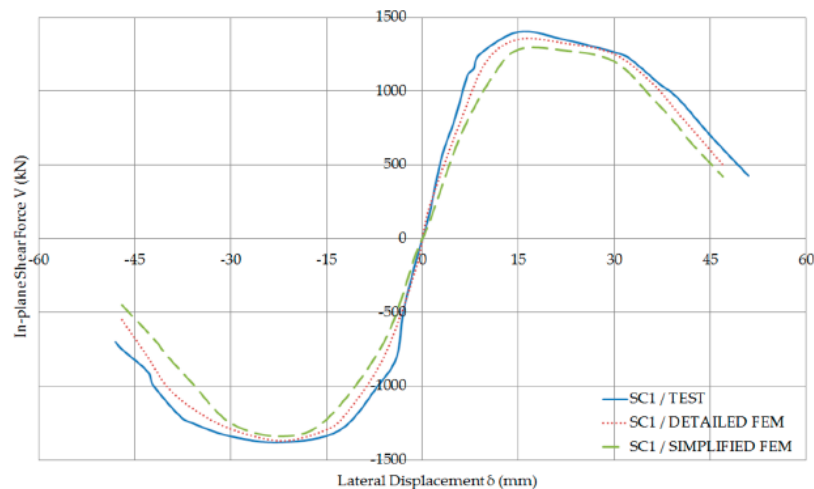


Figura 6. Comparació de l'experimentació real amb models realitzats amb ANSYS [10]

El fet que es puguin desenvolupar models molt pròxims a la realitat indica una gran comprensió del comportament dels elements de l'estructura i per tant fa que les tecnologies que ara mateix s'utilitzen siguin cada cop més fiables.

També es fa recerca en noves aplicacions per aquest material compost, com poden ser la protecció balística.

En el cas de protecció contra impactes d'elevada velocitat, tenint en compte que les propietats del compost dóna lloc a aplicacions que el formigó o l'acer per separat no aconseguirien, s'aconsegueix una resistència a impactes d'elevada velocitat considerable. [11]



Figura 7. Imatge d'una proveta de formigó amb dues làmines d'acer a front i al darrere després d'un impacte balístic [11]

Tot i això, el formigó armat amb acer, presenta certes debilitats sobretot en entorns on el contacte amb l'aigua és usual i provoca l'oxidació de l'armat.

Per aquest motiu, la indústria comença a buscar alternatives per reforçar el formigó sense que el reforç sigui vulnerable a la corrosió. Els materials seleccionats són diferents tipus de fibres. Entre altres, les més rellevants són:

- Formigó reforçat amb fibres naturals (NFRC)
- Formigó reforçat amb fibra de vidre (GFRC)
- Formigó reforçat amb fibra de carboni (CFRC)

Aprofundirem al cas que es duu a terme a aquest estudi, que és el reforçament amb fibra de carboni (CFRP).

2.2. Reforç estructural del formigó amb fibra de carboni

Els materials compostos, més encara els més nous, es van començar a aplicar i s'apliquen en la construcció per rehabilitar estructures de formigó danyades o amb problemes. El reforç intern-extern d'estructures noves és encara una àrea a desenvolupar-se.

De manera que la informació d'aquest punt consistirà en una ullada a la utilització de CFRP per al manteniment d'estructures de formigó danyades.

La fibra de carboni és una fibra extremadament fina (diàmetres entre 7 i 10 μm) de propietats mecàniques elevades, com es comprova a la taula 1, on es fa una comparació entre les propietats de la fibra de carboni i l'acer. [12]

Taula 1. Comparació de les propietats de la fibra de carboni i l'acer [12]

Material type		Density ρ (kg/m^3)	Tensile Strength σ_u (GPa)	Elastic Modulus E (GPa)	Breaking Length $\sigma_u/(\rho g)$ (km)
Carbon fiber	Standard	1760	3.53	230	205
	High strength	1820	7.06	294	396
	High modulus	1870	3.45	441	188
Steel	S355	7850	0.50	210	6
	Wire	7850	1.77	210	23

És una fibra que a més d'aportar resistència, té altres propietats valuoses com la seva baixa densitat, la seva elevada resistència a la temperatura i flexibilitat, i la baixa expansió tèrmica.

Per a les diferents aplicacions a les quals està destinada, la fibra és combinada amb altres materials per la creació d'un material compost. Un dels principals materials utilitzats conjuntament amb la fibra de carboni és la resina. Un producte que inicialment és líquid, però que amb la combinació d'un catalitzador és capaç de solidificar-se. D'aquesta manera la combinació de resina i fibra de carboni dona lloc als materials composts polimèrics reforçats amb fibra de carboni (*Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP*).

La principal raó per la utilització d'aquest tipus de reforçament és degut al fet que el formigó hagi patit desperfectes durant el servei i sigui necessari un reforçament.

La fibra de carboni pot reforçar el formigó de diferents formes, però la més usual és el reforçament superficial mitjançant làmines o tires adherides amb alguna resina epoxi.

Aquestes làmines estan formades per teixits de fibra de carboni que amb l'addició de resina, un cop passat el temps d'asseccament, es converteixen en un material compost sòlid i rígid. El fet que sigui un teixit, fa que la resistència sigui més elevada que si fos un no teixit, com es reflecteix a la taula 2. [13]

Taula 2. Comparació de la fibra de carboni en teixits i no teixits [13]

	<i>Quasistatic strengths (MPa)</i>				<i>Fatigue strengths at 10⁶ cycles (MPa)</i>			
	<i>Tension</i>		<i>Compression</i>		<i>Zero-tension</i>		<i>Tension–Compression</i>	
	<i>Unnotched</i>	<i>Notched</i>	<i>Unnotched</i>	<i>Notched</i>	<i>Unnotched</i>	<i>Notched</i>	<i>Unnotched</i>	<i>Notched</i>
Nonwoven	714	477	613	305	610	> 477	420	302
Woven	597	321	542	270	450	> 321	220	143

En estar en un teixit les fibres de carboni estan orientades i sempre que se'ls exigeixi en la direcció de la fibra, presentarà una resistència major que si se li exigeix quan les fibres no estan orientades. En el cas de la bobina de la Figura 8, les fibres de carboni estan orientades en la longitud de la bobina i no en l'ample.

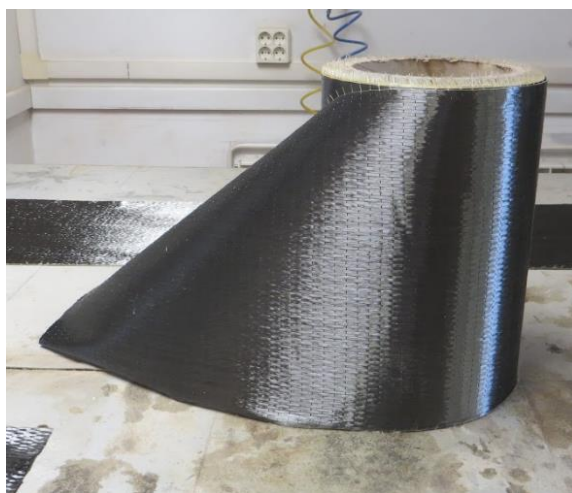


Figura 8. Bobina de fibra de carboni

Al 2004, Heffernan P.J. i Erki M.A. estudien la variació en el comportament de bigues de 3 m amb reforçament de CFRP a la part inferior de l'espècimen i sense[14]. A la Figura 9 es mostra les seccions de les bigues utilitzades, que seran sotmeses a dos tipus de càrregues de flexió:

- Una càrrega que augmenta fins al trencament de la biga. S'assajarà un espècimen de cada tipus.
- Un cicle de càrregues de mitjana intensitat. S'assajaran dos espècimens de cada tipus.

Per poder determinar el comportament de l'estructura a càrrega màxima i a fatiga.

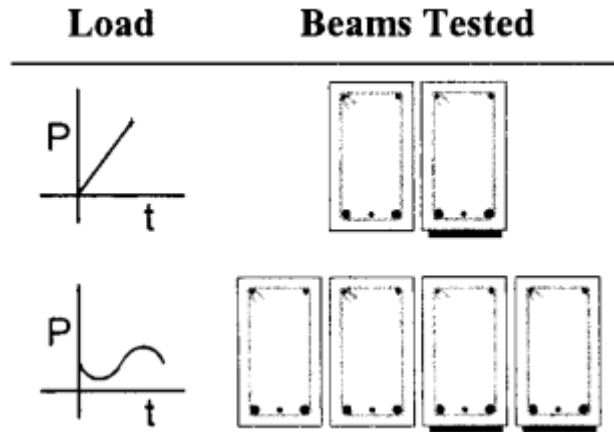


Figura 9. Secció de les bigues de l'estudi de Heffernan i Erki [14]

Utilitzen una configuració d'assaig on la biga té 4 punts de contacte amb l'equipament:

- Dos punts equidistants al centre de la biga on s'aplica la càrrega.
- Dos recolzaments molt a 75 mm dels extrems, on hi ha un recolzament fixe que permet el gir, i l'altre que permet el gir i el desplaçament horitzontal (Figura 10)
-

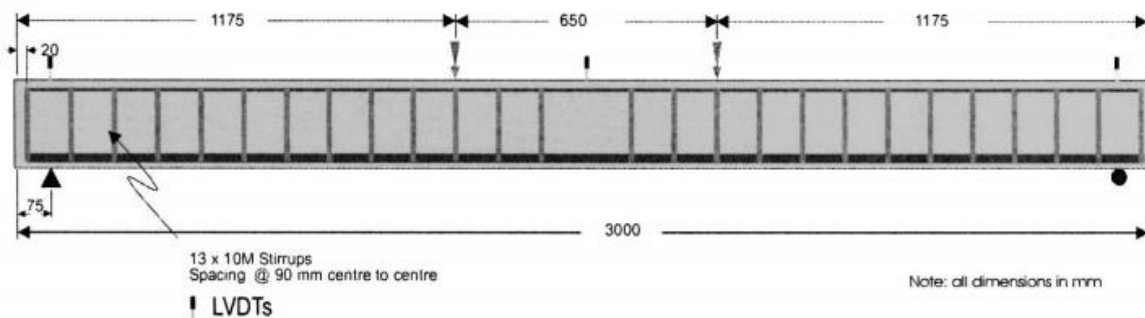


Figura 10. Configuració de l'assaig de Heffernan i Erki [14]

Amb els resultats experimentals determinen que la utilització del reforçament del CFRP millora les propietats estructurals de la biga.

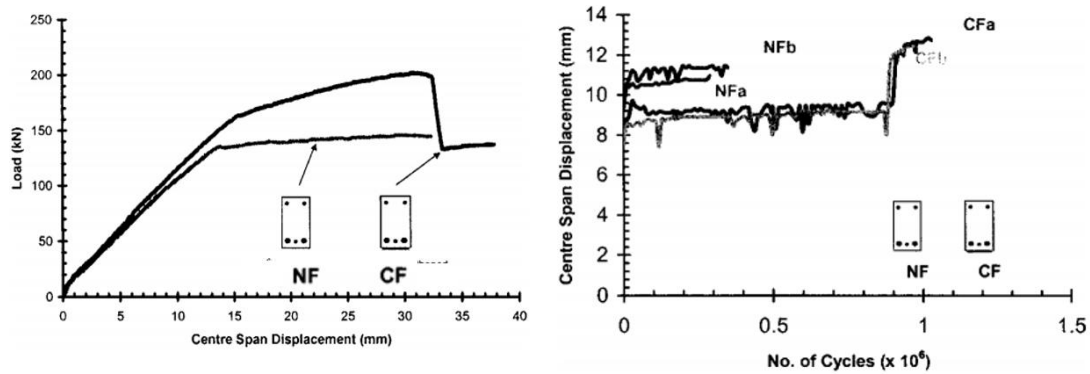


Figura 11. Resultats experimentals de Heffernan i Erki [14]

A l'esquerra de la Figura 11 hi ha l'assaig de flexió a ruptura, es veu l'espècimen CF (reforçat) suporta una càrrega més elevada, així com permet un desplaçament major.

En el cas de l'estudi a fatiga, els espècimens reforçats, aguanten més del doble de cicles que el seu idèntic sense reforçament.

D'aquesta manera es demostra clarament com el reforçament superficial mitjançant làmines de fibra de carboni suposa una millora estructural considerable.

Tot i això, hi ha diverses maneres de col·locar el reforçament superficial de fibra de carboni, tenint en compte quines són les àrees més importants a reforçar.

L'any 2014, Abduljalil B. Estudia l'estructura de la Figura 12 una paret amb dues obertures. Experimenta amb un assaig de flexió a 4 punts per veure la diferència de comportament entre una paret llisa i amb obertures i, després col·loca reforçaments de tires de fibra de carboni en diferents configuracions. També avalua l'impacte que té la utilització d'ancoratges mecànics entre les tires i la biga. [15]

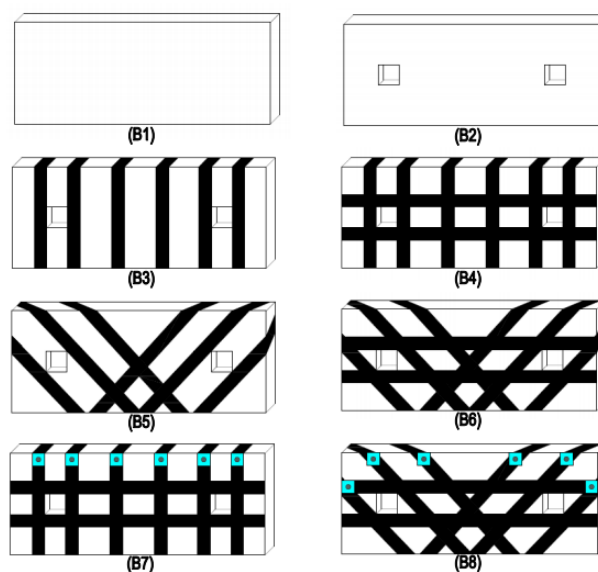


Figura 12. Configuracions d'assaig del treball de Abduljalil B. [15]

La configuració de l'assaig és la següent, que consisteix en l'aplicació de dues càrregues idèntiques a 75 mm respecte del centre de l'estructura, amb increments de 5kN fins al trencament.

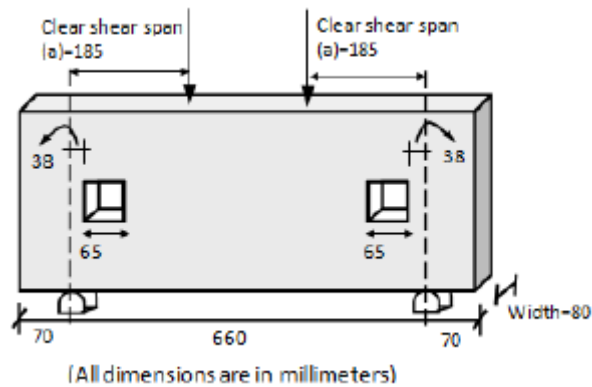


Figura 13. Dimensions de la paret i configuració de l'assaig [15]

Les parets sotmeses a flexió trenquen a partir de fissures que es propaguen i acaben provocant una ruptura per tallant.



Figura 14. Espècimens després de l'assaig de flexió [15]

2.3. Assaig de rasant a estructures híbrides

Per calcular la resistència a rasant d'estructures híbrides hi ha diferents mètodes, els quals es poden classificar en dos grans grups [16]:

- Amb dues làmines de CFRP.

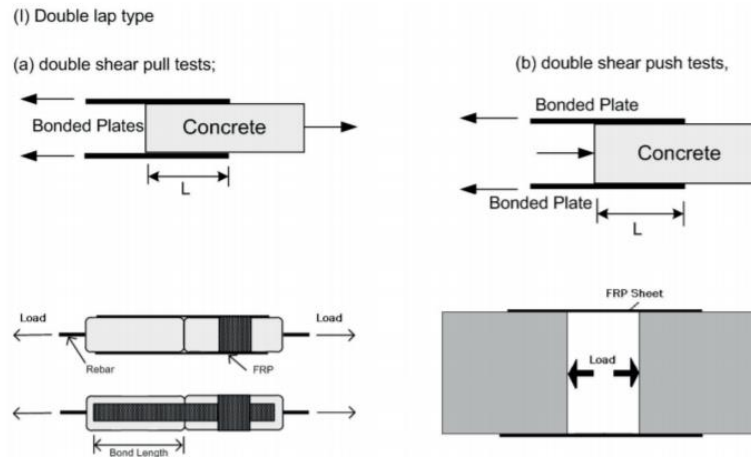


Figura 15. Tipus d'assaig de rasant amb estructures amb dues làmines de reforçament [16]

- Amb una làmina de CFRP.

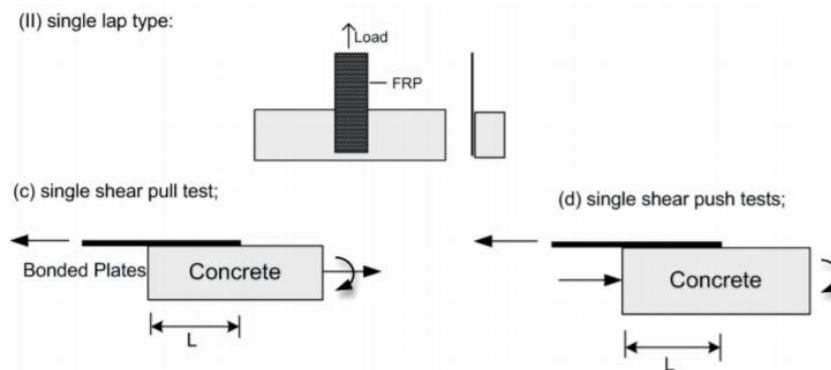


Figura 16. Tipus d'assaig de rasant amb estructures amb una làmina de reforçament [16]

Es pot intuir que el fet de tenir una segona làmina de CFRP fa que l'estructura tingui una resistència a tallant més elevada que la que té una única làmina.

Cada mètode aplica la càrrega a tallant d'una manera diferent, sigui al CFRP mantenint el formigó fixe o al contrari.

El mètode que s'utilitzarà a aquest estudi, no coincideix amb cap dels mètodes anteriors, a causa del fet que la geometria del CFRP impossibilita el contacte directe.

2.4. Assaig de flexió a estructures híbrides

En el cas d'assajos de tracció, també hi ha diferents tipus de configuració d'aquest, tenint en compte la quantitat de punts de recolzament:

- Assaig de flexió a 4 punts: Consisteix a tenir dos recolzaments sota la biga i també hi ha dos punts d'aplicació de la força.

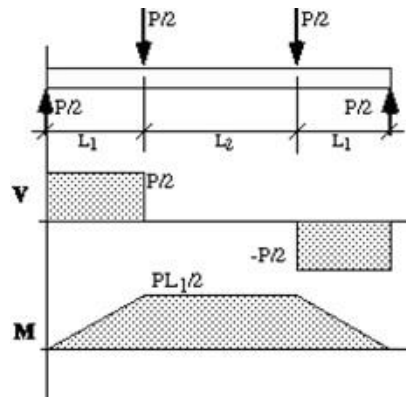


Figura 17. Assaig de flexió a 4 punts [17]

- Assaig de flexió a 3 punts: Consisteix a tenir dos recolzaments sota la biga i un únic punt d'aplicació de força al centre de l'estructura.

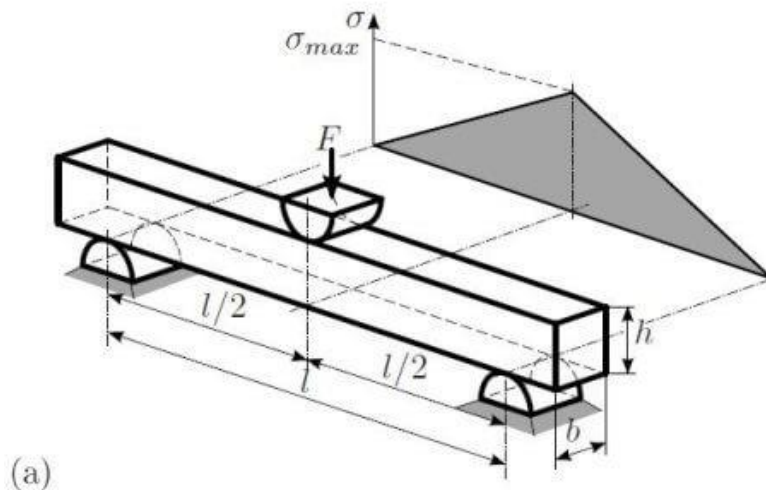


Figura 18. Assaig de flexió a 3 punts [18]

En el cas d'aquest estudi, s'assajarà amb una configuració de 3 punts.

3. Selecció dels casos a estudiar i la geometria dels espècimens

Aquest apartat introdueix tant els casos que s'estudiaran com la geometria dels espècimens de rasant i de flexió.

3.1. Selecció dels casos

A l'hora de seleccionar els casos d'estudi, es va tenir en compte els materials que és conegut que donen resistència friccional:

- Grava
- Sorra

I un element que aportés resistència mitjançant l'ancoratge mecànic directe, però mantenint certa flexibilitat.

- Fibra de vidre

Tant la grava com la sorra són materials que moltes vegades formen part de la composició del formigó i per tant tenen certa afinitat amb el mateix. La malla de fibra de vidre, s'havia utilitzat anteriorment durant la realització de l'optativa d'Estructures Avançades amb el professor Lluís Gil i es tenia constància del seu bon funcionament en conjunt amb el formigó. A més és un material dissenyat per al reforç d'estructures de formigó i obra de fàbrica.

De manera que inicialment es va plantejar per als dos tipus d'assaig les següents configuracions:

- Res
- Pedra
- Pedra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla a 45°

Tot i això, es va decidir eliminar el cas Res dels espècimens de flexió, gràcies al coneixement de la mala adherència del formigó al CFRP i per tant assumint que la seva resistència seria negligible a l'hora de fer una comparació amb els altres casos. També va afavorir l'execució de l'estudi degut a la diferència entre les dimensions de les provetes, ja que les provetes de flexió són notablement majors que les de rasant i per tant hagués suposat un temps extra a la planificació.

3.2. Geometria dels espècimens

A aquest apartat es pretén donar a conèixer la raó de la geometria dels espècimens dels diferents assaigs.

La geometria de la base del CFRP, amb forma d'*omega shape*, i la geometria dels espècimens de flexió ve donada per l'assaig que es va realitzar prèviament a aquest estudi amb els alumnes de l'optativa d'Estructures Avançades amb el professor Gil.

Les dimensions, en mm, dels espècimens de flexió són les següents:

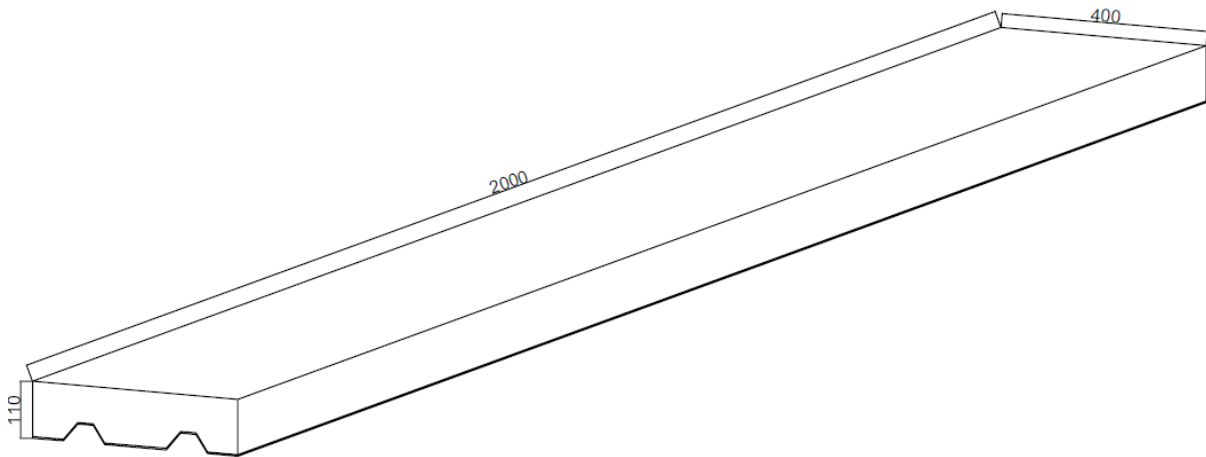


Figura 19. Dimensions dels espècimens de flexió en mm

En el cas dels espècimens, es manté el CFRP amb forma d'*omega shape* però la geometria de l'espècimen és diferent a causa del tipus d'assaig, on la força es reaccionarà sobre una part de l'espècimen i s'aplicarà al centre de la secció de l'altra, que és més petita.

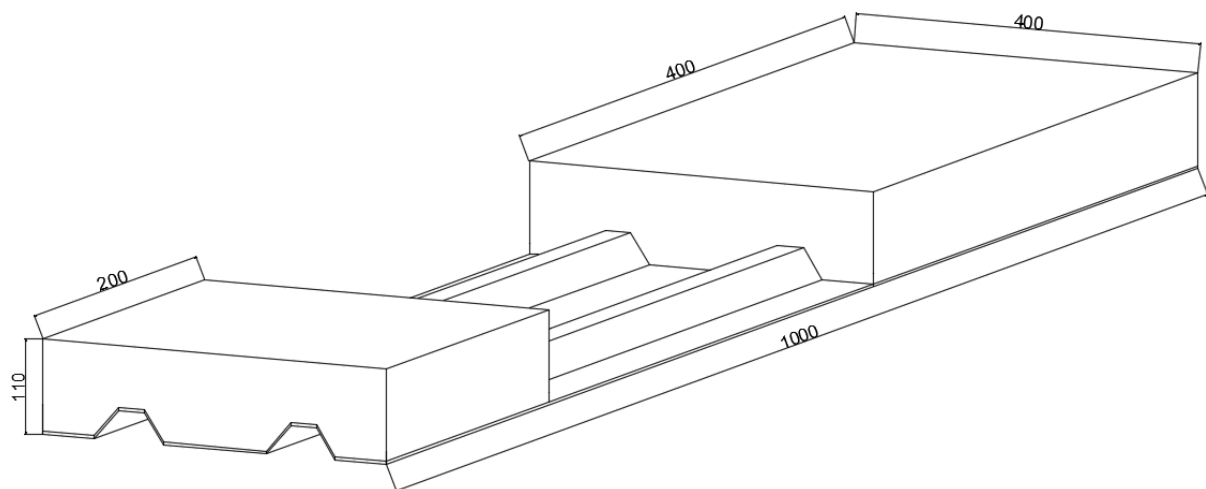


Figura 20. Dimensions dels espècimens de rasant en mm

4. Avaluació dels riscos i mesures preventives

Degut a la varietat de materials i possibles riscos que comporten les tasques a realitzar, és necessari especificar les mesures de seguretat (EPIs) per a cadascuna d'elles.

La mesura de seguretat bàsica deguda únicament a estar treballant al laboratori:

- L'ús de bata de laboratori: per evitar qualsevol mena de contacte directe entre els materials i la pell.
- Guants mecànics: per evitar lesions a les mans.

A continuació es detallen les mesures específiques per a la manipulació de productes químics, fibra de carboni i utilització d'eines de tall.

La taula 3 recull els diferents materials, productes i tasques que tenen riscos importants associats, així com les mesures de seguretat adients.

Taula 3. Riscos i mesures de seguretat amb productes químics i perillosos

Producte	Riscos	Mesures de seguretat
Dissolvent	<ul style="list-style-type: none"> • Líquids i vapors molt inflamables • Pot provocar danys al sistema nerviós després d'exposicions prolongades o inhalació • Nociu en cas d'ingesta o inhalació • Irritació cutània • Irritació ocular • Pot provocar somnolència o vertigen 	<ul style="list-style-type: none"> • Bata de laboratori • Guants de làtex • Ulleres de seguretat • Mascareta
Resina Epoxi i enduridor	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar contacte amb els ulls o la pell • Tòxic en cas d'ingesta, inhalació o contacte amb la pell 	
Alcohol	<ul style="list-style-type: none"> • Líquids i vapors inflamables • Tòxic en cas d'ingesta, inhalació o contacte amb la pell • Danys al nervi òptic i sistema nerviós central en cas d'ingesta 	
Fibra de carboni	<ul style="list-style-type: none"> • Irritació a la pell en cas de contacte 	

Les tasques que requereixen unes mesures de seguretat diferents són:

Taula 4. Mesures de seguretat per a tasques perilloses

Tasca	Riscos	Mesures de seguretat
Tallar CFRP	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar contacte d'encenalls amb els ulls • Risc d'inhalació de fibres 	<ul style="list-style-type: none"> • Bata de laboratori • Guants mecànics • Ulleres de seguretat • Mascareta
Tallar fusta	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar contacte d'encenalls amb els ulls 	
Moure elements de gran pes (persona autoritzada)	<ul style="list-style-type: none"> • Caiguda sobre una extremitat amb risc de trencament 	<ul style="list-style-type: none"> • Botes de seguretat

5. Procés constructiu

La creació dels diferents espècimens a assajar consta de tres etapes diferenciades:

- Creació del compòsit CFRP: Consisteix a l'aplicació de la barreja amb resina sobre les "capes" de fibra de carboni.
- Preparació del compòsit CFRP segons el cas a assajar: Per als assajos de rasant i flexió, com ja s'ha comentat als apartats previs, cal afegir els materials addicionals que vénen donat pels diferents casos de connexió a estudiar.
- Formigonat de l'espècimen: un cop es té el compòsit FRP preparat, es formigona.

5.1. Materials i equipaments

Aquest apartat dóna resposta a la necessitat de quins materials i equipaments són necessaris per a la fabricació tant de les provetes com del prototip.

Els materials indispensables per a la fabricació de CFRP són:

- Fibra de carboni, MasterBrace® FIB 300/50 CFS
Consisteix en una làmina de fibra de carboni unidireccional d'alta resistència.
- Resina Epoxi, Resoltech 1200
Resina epoxi de laminació manual d'última generació formulada sense diluents reactius.
- Enduridor Epoxi, Resoltech 1204
Catalitzador que barrejat amb la resina dóna lloc a la reacció de l'enduriment d'aquesta.

Altres materials utilitzats han estat:

- | | | |
|-------------------|--------------|---------------------------|
| • Paper de forn | • Dissolvent | • Làmina d'acer perfilada |
| • Gots de plàstic | • Pinzells | • Tisores |
| • Mesclador | | |

L'equipament necessari per a la fabricació del CFRP ha estat:

- Balança de precisió: per pesar els diferents elements necessaris.

Els materials utilitzats per el condicionament dels espècimens han estat:

- Pedra, Grava 5/12 Sorigue:
Grava neta artificial, sense gra fi.
- Sorra, sorra estàndard (0-4 mm) Mause:
Barreja de compostos de sorra neta.
- Malla de fibra de vidre, Mapegrid G220:
Malla de fibra de vidre resistent als àlcalis, preaprestada, per al reforçament estructural armat.

Altres materials utilitzats han estat:

- Resina Resoltech1 200
- Gots de plàstic
- Dissolvent
- Enduridor Resoltech 1204
- Pinzells

L'equipament necessari per al condicionament dels espècimens ha sigut:

- Balança de precisió: per pesar els elements necessaris.
- Serra radial Hitachi G125R4 (S): per tallar el CFRP fabricat de manera que tingui les dimensions corresponents de la proveta a assajar.

El material utilitzat per al formigonat ha estat:

- Formigó, Formigó sec Fiasa HS-25
Barreja homogènia d'àrids, ciment i additius en sec.
- Taulells de fusta
S'aprofiten els taulells de fusta utilitzats per a estudis previs per a l'encofrat dels espècimens.

Altres materials han estat:

- Aigua
- Paleta d'obrar
- Gerra mesuradora
- Galleda
- Cabàs de plàstic
- Paper film
- Cinta d'emascarar
- Silicona

L'equipament necessari per al formigonat, ha estat:

- Trepant/Tornavís elèctric: per a la unió dels diferents taulells de fusta que encofren els espècimens.
- Formigonera: on es duu a terme la barreja de formigó i aigua.
- Transpalet: per transportar els elements de gran pes, com els sacs de formigó, la formigonera i la barreja de formigó. (Pel fet que es formigonava a l'exterior i posteriorment es portava la barreja al lloc de formigonat, a l'interior).
- Martell mecànic: tenint un element intermedi (una peça de fusta) col·locada sobre una de les parets de l'encofrat, permet la vibració del formigó per a l'extracció de l'aire, homogeneïtzant la barreja.

5.2. Fabricació del compòsit CFRP

Primer de tot, es prepara una fulla de paper de forn de dimensions aproximades de 2x1,2 m. En cas que les dimensions de les fulles de paper de forn siguin inferiors, aquestes s'uneixen mitjançant cola en barra, de manera que queda una única fulla de les dimensions esmentades totalment segellada, de manera que la resina no entri en contacte amb el perfil d'alumini inferior.

A continuació es col·loca sobre el perfil d'acer i es fixa mitjançant unes pinces de “doble clip” per facilitar la col·locació de la fibra de carboni i la resina.

Abans de col·locar la primera capa de fibra de carboni, aquesta ha de ser pesada per poder elaborar la quantitat necessària de resina + enduridor, ja que el pes final de la barreja ha de ser el mateix que el pes de fibra de carboni. La relació entre la massa de resina i enduridor és de 35 g d'enduridor cada 100 g de resina.

A la taula 5 hi ha un exemple del càlcul de la barreja.

Taula 5. Exemple de càlcul de proporcions de resina i enduridor

Material	Pes (g)
Massa de CFRP corresponent a una sola capa	531,4
Massa de resina	393,6
Massa d'enduridor	137,8

Un cop es col·loca a un got les masses corresponents de resina i enduridor, aquestes s'han de barrejar amb un mesclador fins que formin una sola fase.

Seguidament es col·loca la meitat de la barreja estesa sobre el paper de forn, de manera que tota la superfície en contacte amb fibra de carboni quedi impregnada. Es col·loca la primera capa de fibra de carboni, que és paral·lela a l'aresta de 2 m del motlle. Com la fibra no té les

dimensions necessàries, s'utilitzen dues tires de 2x0,5 m que es superposaran per afavorir l'homogeneïtat del CFRP. S'agafa una de les fulles i es col·loca al motlle. És molt important que la fibra vagi adquirint la forma del perfil d'alumini, de manera que s'ha d'anar pressionant longitudinalment sobre les crestes del perfil. Un cop està situada, es col·loca l'altra fulla de fibra, superposant al centre, de manera que l'amplada final del CFRP sigui de 80 cm, i es pressiona sobre les crestes del perfil.

Amb la fibra ja col·locada, es procedeix a aplicar l'altra meitat de barreja amb pinzells. Cal remarcar que l'aplicació de la resina ha de ser en la direcció de les fibres, de manera que en aquest cas s'aplicaran pinzellades longitudinals sobre tota la superfície fins a esgotar la barreja.



Figura 21. Aplicació de la barreja de resina i enduridor

A continuació es duu a terme la preparació de la barreja de resina amb enduridor corresponent a la segona capa de fibra de carboni.

Amb la barreja preparada, es col·loca la fibra de carboni, que ara ha d'anar transversalment per afavorir un comportament isotròpic del CFRP. Les dimensions de les fulles de fibra de carboni és d'aproximadament 0,5x1 m de manera que es necessiten 4 fulles de fibra.

Es col·loquen les fulles de fibra de carboni, deixant una superposició mínim de 2 cm i es pressiona sobre les crestes i valls, per garantir que no hi ha aire entre capes que puguin formar defectes al CFRP final. Quan està col·locada i ja lleugerament pressionada, s'aplica amb els pinzells tot el got de barreja sobre la superfície, parant atenció a les crestes. Per millorar la penetració de la barreja, es pot pressionar perpendicularment amb el pinzell repetidament.

Finalment es prepara la tercera barreja de resina corresponent a l'última capa de fibra de carboni que es col·locarà.

Aquesta última capa tindrà la mateixa direcció que la primera, és a dir, paral·lela a l'aresta de 2 m del motlle.

Es col·loquen les dues fulles al motlle, amb una superposició central i s'aplica pressió perquè

agafi la forma desitjada. S'aplica tot el got de barreja, en el sentit de la fibra (longitudinal) fent pressió perpendicular amb el pinzell on acaben les crestes, que és el punt més crític del CFRP.



Figura 22. Comparació d'acabats de CFRP

Finalment, es deixen els pinzells en remull amb dissolvent per a la seva posterior neteja i es disposen fulles de paper de forn sobre el CFRP, aquestes fulles no cal que estiguin adherides de manera que formin una única capa. S'ha de fer pressió a tota la superfície, de manera que quedin les mínimes bombolles d'aire, que són les causants de què hi hagi zones de CFRP que no continguin la quantitat de resina necessària. Un cop tota la superfície està coberta, es col·loca el contra motlle a la part superior. Sobre en contramotlle es col·loquen pesos repartits sobre tota la superfície, de manera que la pressió a la qual està sotmesa el CFRP sigui la més homogènia possible.



Figura 23. Període d'asseccament del CFRP

A continuació es deixa assecat durant un mínim de 48 h.

Un cop està assecat la làmina de CFRP de 0,8x2 m, aquesta, depenent de per l'ús al que vagi destinat, es talla per la meitat, formant dues làmines de 0,4x2 m (per provetes de flexió) o es talla en quatre làmines de 0,4x1 m (per provetes de rasant).

5.3. Condicionament del CFRP

La làmina de CFRP cal condicionar-la depenent del cas al qual vagi destinat, que poden ser:

Assaig de rasant

- Res
- Pedra
- Pedra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla inclinada a 45°

Assaig de flexió

- Pedra
- Pedra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla
- Pedra + Sorra + Malla inclinada a 45°

A continuació s'explicarà el procediment que es necessita seguir en el cas que es vulgui afegir al CFRP pedra, malla o sorra.

- CFRP sense res

Aquest cas es troba per les provetes de rasant i com, indica el seu nom, no cal fer cap mena de condicionament abans del formigonat.

- CFRP amb pedra

En el cas de pedra, aquestes es col·loquen a les valls del CFRP amb la barreja de resina que s'ha utilitzat per a la fabricació del CFRP.

A la Taula 6 es troben les quantitats necessàries de pedra i barreja de resina per als dos tipus d'espècimens.

Taula 6. Quantitats de resina per l'addició de pedres

	Espècimen de rasant	Espècimen de flexió
Dimensions	0,4x1 m	0,4x2 m
Massa de pedres (g)	400	1200
Massa de resina (g)	100	222
Massa d'enduridor (g)	35	78

El procediment comença amb la impregnació de les valls de la làmina de CFRP amb resina fins a esgotar la barreja preparada. A continuació es deixen caure, manualment, pedres sobre tota la superfície intentant que hi hagi una certa homogeneïtat en la quantitat de pedres que hi ha repartides. Finalment es deixa assecar durant 48h.

El procediment de neteja dels pinzells és el mateix que durant la preparació del CFRP, es deixen amb dissolvent i es netegen manualment amb dissolvent i aigua. S'assequen els pèls primer amb paper i finalment amb aire comprimit.

- CFRP amb sorra

La sorra es col·loca als plans inclinats del CFRP mitjançant l'ús de resina.

Es prepara una barreja de resina i enduridor. S'impregnen els plans inclinats amb la totalitat de la barreja i a continuació s'aboca la sorra manualment.

És important que la sorra estigui distribuïda el més homogèniament possible perquè en cas d'una acumulació elevada de sorra a llocs puntuals, pot afavorir el lliscament del formigó sobre el CFRP, reduint les propietats estructurals.

A la Taula 9 es poden observar les quantitats utilitzades tenint en compte el tipus de proveta.

Taula 7. Quantitat de barreja a preparar per a l'addició de sorra

	Espècimen de rasant	Espècimen de flexió
Dimensions	0,4x1 m	0,4x2 m
Massa de sorra (g)	200	500
Massa de resina (g)	55	74
Massa de catalitzador (g)	20	26

- CFRP amb malla

En aquest cas, la malla s'unirà a la làmina de CFRP a les crestes mitjançant una nova capa de CFRP amb resina. El procediment és el mateix tant per la malla recta com per la malla inclinada a 45°.

El procediment consisteix a tallar la malla de les dimensions de la proveta, i tallar unes tires de fibra de carboni que faran de nexa amb el CFRP. Es pesen les tires de fibra de carboni a utilitzar i es calcula la quantitat de resina i catalitzador que es necessiten mitjançant la relació ja esmentada a l'apartat 5.2.

Un cop s'ha barrejat en un got fins a obtenir una única fase homogènia, amb un pinzell s'aplica part de la barreja sobre les crestes de la làmina de CFRP. Un cop està ben impregnat, es col·loca la malla fent pressió perquè s'adhereixi amb la resina. Finalment es col·loquen les tires de fibra de carboni sobre la malla i es fa pressió perquè entri en contacte amb la resina que hi ha sobre la làmina de CFRP.

A continuació s'aplica la resta de la barreja de resina preparada, amb un pinzell de manera que la nova capa de CFRP s'adhereixi bé a la làmina ja fabricada.

Finalment es col·loca paper de forn sobre les crestes de la làmina de CFRP i es col·loquen pesos repartits sobre tota la superfície.

Es deixa assecar durant 48 h.

5.4. Formigonat

Un cop els espècimens són condicionats amb el cas que li pertoca, s'inicia l'última etapa del procés constructiu, el formigonat.

Aquesta etapa consisteix a l'encofrat del CFRP mitjançant taulells de fusta, el segellament dels mateixos per evitar que hi hagi fugues d'aigua i, finalment el formigonat.

Per encofrar els espècimens, calen taulells de fusta de dimensions mínimes de les provetes. Per reduir els costos i residus, s'utilitzen taulells que han estat utilitzats per a altres estudis anteriors i que conserven un bon estat per a l'aplicació i es tallen de les dimensions necessàries amb l'ajuda d'una caladora.



Figura 24. Preparació dels taulons de fusta mitjançant la caladora

Les dimensions mínimes per a provetes de rasant són dos taulons de 0,4x0,11 m i dos més de dimensions 0,11x1 m.

Les dimensions per a provetes de flexió són dos taulons de 0,4x0,07 m i dos més de dimensions 0,07x2 m.

A continuació es cobreixen els taulons amb paper film i s'adhereix amb cinta d'emascarar, per a protegir els taulons i facilitar l'extracció dels mateixos un cop s'ha formigonat.

S'uneixen els taulons corresponents mitjançant l'ús de caragols utilitzant el trepant/tornavís elèctric aconseguint la geometria desitjada i es col·loca el CFRP condicionat. A continuació mitjançant plastilina o silicona, se segellen totes les arestes de l'encofrat per a garantir que no hi hagi fugues d'aigua durant el període de presa i enduriment.

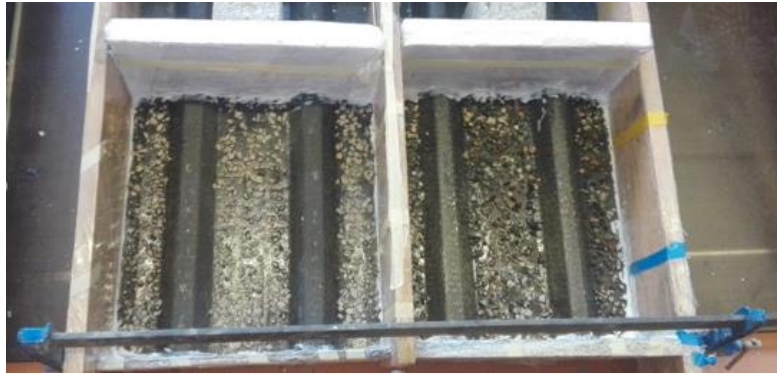


Figura 25. Encofrat segellat

Finalment, un cop es té l'encofrat preparat, amb l'ajuda de la formigonera es prepara la barreja de formigó amb aigua.

El formigó utilitzat necessita 2,5 L d'aigua per a cada sac de 25 kg (proporció donada pel fabricant) i la formigonera únicament té capacitat per a la barreja de 2 sacs simultàniament.

Si és el primer ús de la jornada de la formigonera, aquesta ha de ser prèviament mullada a causa del fet que les parets absorbeixen part de l'aigua, de manera que si no es mulla prèviament, la barreja d'aigua i formigó no seria la correcta.

Un cop mullada i barrejant els 5L d'aigua i els 50 kg de formigó, la formigonera necessita entre 5 i 10 minuts per aconseguir una barreja homogènia, que s'abocarà al cabàs i es transportarà fins als encofrats.



Figura 26. Zona de preparació del formigó

Es col·locarà manualment el formigó als encofrats intentant que hi hagi una distribució la més homogènia possible i que tingui la mateixa alçada. És important que a aquells que tenen malla, el formigó traspassi correctament sota la malla, ja que es necessita un bon contacte entre el formigó i el CFRP condicionat per a poder estudiar la interacció entre els elements.



Figura 27. Comparació d'acabats del formigó en espècimens amb malla

Un cop s'arriba a l'alçada corresponent per als dos tipus d'espècimens, es repassa la superfície i es comprova que el nivell i les dimensions són les correctes.

També s'agafa una mostra de formigó al motlle cúbic, per a la caracterització del material.

En el cas de les provetes de flexió, on la seva longitud és molt superior a l'amplada i a l'haver utilitzat fusta, que té una petita capacitat de deformació, es col·loquen serjants al llarg de la longitud per evitar la dilatació a la zona central de l'encofrat.



Figura 28. Espècimen de flexió amb serjants per evitar la dilatació central

Cap a finals de la fabricació, es van desenvolupar diferents elements per a millorar la compacitat del formigó, extraient l'aire que queda atrapat i que redueix la seva resistència.

Aquests elements han estat un element per aplicar pressió manualment i la utilització d'un martell mecànic per a la vibració del formigó.



Figura 29. Elements per millorar la compacitat del formigó

Amb els quals ha estat possible una millora en els acabats dels espècimens.

Un cop formigonats els espècimens, aquests es cobreixen amb paper film per evitar l'evaporació de l'aigua durant el període de presa i enduriment inicial. Passada 1 setmana, es poden retirar els encofrats per ser utilitzats a altres espècimens i passades 3 setmanes més es poden començar a fer els assaigs.

6. Experimentació

L'experimentació ha constatat de 3 assajos diferenciats. A continuació s'expliquen breument.

- Assaig de resistència a compressió: ens permet caracteritzar el formigó.
- Assaig de rasant: Consisteix a l'aplicació in situ d'una força al centre de la secció de l'espècimen.
- Assaig de flexió: Consisteix a l'aplicació d'una càrrega puntual al centre d'una estructura recolzada a 10 cm dels seus extrems.

6.1. Assaig de resistència a compressió

L'assaig de resistència a compressió permet, com el seu nom diu, a la determinació de la resistència a compressió del formigó.

Hi ha diferents mètodes per a la determinació d'aquesta, i tot i que es van preparar provetes per l'assaig uniaxial de compressió simple, al final no es va obtenir el permís per posar en funcionament els equips necessaris i es va determinar la resistència a compressió mitjançant un escleròmetre.

L'assaig escleromètric, o d'índex de rebot mitjançant escleròmetre. És un assaig per mitjans no destructius que s'efectua amb un martell SCHMIDT. Aquest martell projecta una massa, amb una molla, que colpeja un plançó en contacte amb la superfície del formigó i el resultat s'expressa en termes de la mesura de la distància de rebot, que és traduïble a resistència mitjançant un gràfic donat pel fabricant, tenint en compte la posició de l'escleròmetre a l'hora de realitzar l'assaig.

Per dur a terme aquest assaig, primer de tot cal que la superfície sigui la més llisa possible i, seguint amb les instruccions del fabricant, es fan 3 mesures per assegurar el correcte funcionament d'aquest. A continuació, se subjecta fermament l'escleròmetre en una de les 3 posicions que el fabricant dóna, Figura 30.

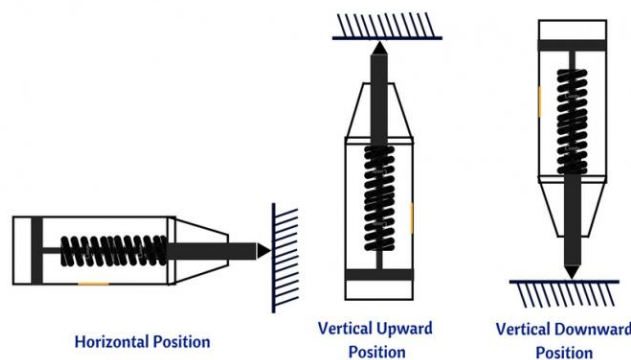


Figura 30. Posicions de mesura de l'escleròmetre [19]

S'aplica força gradualment mantenint sempre l'escleròmetre perpendicular a la superfície fins que es produeix l'impacte de l'escleròmetre (moment on el martell és alliberat) i es produeix la lectura de l'escala.

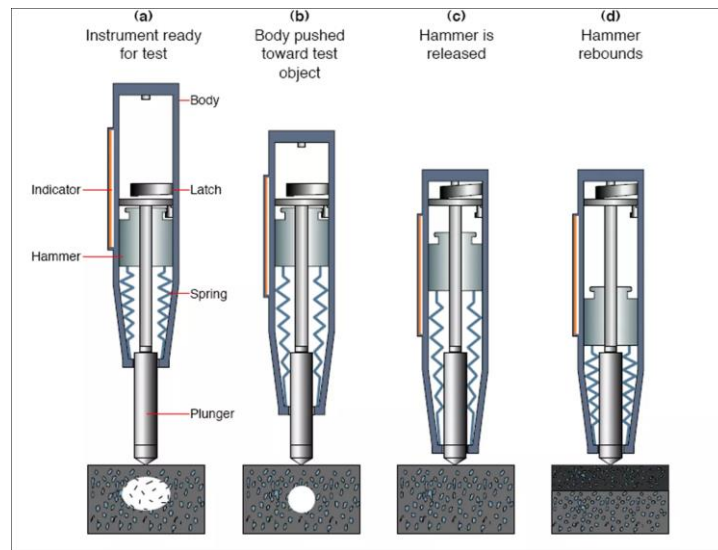


Figura 31. Funcionament de l'escleròmetre [20]

El valor marcat a l'escala lateral de l'escleròmetre, no és el valor de resistència a compressió. Aquest cal que sigui traduït mitjançant un gràfic que normalment es troba sobre el mateix escleròmetre, i que té 3 corbes, cadascuna associada a una de les posicions de l'escleròmetre durant l'assaig.

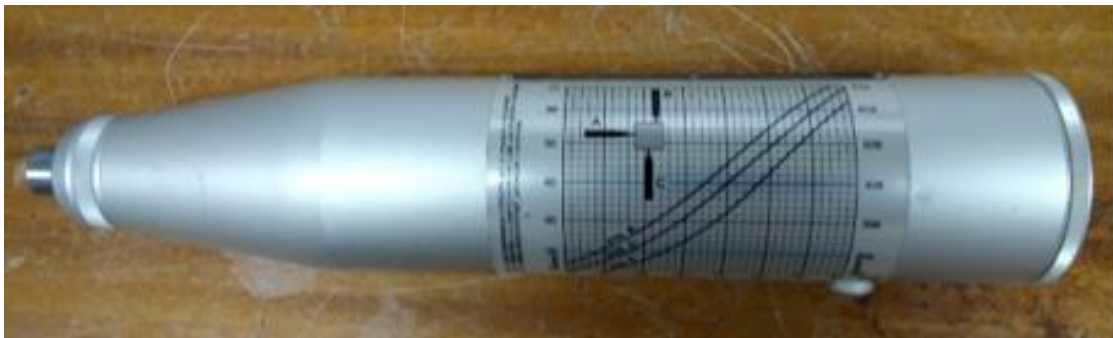


Figura 32. Gràfic que permet traduir la mesura de l'escleròmetre a MPa

Es repeteix l'assaig com a mínim 5 vegades per a cada proveta i amb les mesures es calcula el valor mitjà, que serà el que s'associarà amb l'espècimen assajat.

Els resultats d'aquest assaig per als espècimens es troben reflectits a les Taules 8 i 9.

Taula 8. Resistència a compressió dels espècimens de rasant

Espècimen	Mesures (MPa)					Resistència a compressió (MPa)
Res 1	20,0	18,0	18,0	20,5	18,0	18,9
Res 2	19,0	19,0	17,0	20,0	20,0	19,0
Pedra 1	14,0	18,0	18,0	14,0	18,0	16,4
Pedra 2	22,0	23,5	22,0	21,0	18,0	21,3
Pedra + Malla 1	14,0	15,0	18,0	18,0	15,0	16,0
Pedra + Malla 2	14,0	14,0	18,0	14,0	20,0	16,0
Pedra + Sorra + Malla 1	20,0	20,0	20,5	20,0	22,0	20,5
Pedra + Sorra + Malla 2	22,0	21,5	21,5	20,2	20,0	21,0
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	18,0	20,5	20,0	20,0	20,5	19,8
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	20,0	20,0	20,5	18,5	22,0	20,2

Taula 9. Resistència a compressió dels espècimens de flexió

Espècimen	Mesures (MPa)				Resistència a compressió (MPa)
Pedra 1	18,0	19,5	24,0	16,5	19,0
Pedra 2	22,0	18,0	18,0	24,0	20,8
Pedra + Malla 1	-	-	-	-	20,0
Pedra + Malla 2	21,0	23,0	25,5	21,0	22,6
Pedra + Sorra + Malla 1	19,0	16,5	22,0	17,0	16,4
Pedra + Sorra + Malla 2	22,0	20,0	18,0	22,0	20,4
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	21,0	20,0	21,5	21,0	20,9

A partir d'aquestes dades és possible trobar dades característiques del formigó tals com el mòdul d'elasticitat, la tensió màxima que resisteix a tracció, etc.

El càlcul d'aquestes característiques serà realitzat, si s'escau, a l'apartat de resultats i anàlisi corresponent.

6.2. Assaig de rasant

L'assaig de rasant consisteix a determinar la càrrega màxima que l'espècimen pot resistir, quan aquest és sotmès a un esforç que fa que pateixi una fallada per lliscament.

Per aconseguir aquest tipus de fallada, s'aplica una força paral·lela a la superfície on l'espècimen es troba recolzat mitjançant l'ús d'un gat hidràulic manual, ja que el desplaçament de la proveta no és possible per culpa de la geometria d'aquesta, on la zona central no conté formigó i per tant podria arribar a trencar-se.

El material i equipament necessari per a la realització d'aquest assaig ha estat:

- Gat hidràulic manual: és l'encarregat d'aplicar la força.
- 2 sensors de desplaçament LVDT amb rang de 20 mm i alta precisió (0,02% del rang, 0,004 mm): mesuren el desplaçament del formigó en relació amb la força aplicada.
- Cel·la de càrrega UC9, que mesura fins a 10 kN.
- Perfils d'alumini: s'adhereixen al CFRP i són els que aguanten els sensors de desplaçament.
- Perfil metàl·lic: es col·loca entre la cel·la de càrrega i el formigó per a millorar la distribució de la força.
- Adquiridor de dades MX840A: és l'encarregat d'enviar les mesures dels sensors i la cel·la de càrrega a l'ordinador.
- Ordinador equipat amb *Catman easy*: és el software encarregat de la recollida de dades de l'assaig.
- Adhesiu instantani Loctite ®: S'encarrega de subjectar els perfils d'alumini que subjecten els sensors de desplaçament.

El procediment d'assaig consisteix a la col·locació de dos sensors de desplaçament LVDT, un a cada banda de la secció, aproximadament 1 cm per sobre de la cresta del CFRP, deixant espai al centre on es col·locarà el gat hidràulic juntament amb una cel·la de càrrega, que és l'encarregada de mesurar la força que s'aplica a cada moment. A més, per garantir una millor distribució de la força sobre la secció de l'espècimen, s'ha col·locat un perfil metàl·lic.

A continuació es col·loca el gat hidràulic, que es recolza sobre la peça de formigó més gran de l'espècimen i es col·loca el més proper al CFRP possible per evitar que hi hagi rotacions en el bloc de formigó durant l'assaig.



Figura 33. Equipament de l'assaig de rasant

Quan tot està situat, es comprova que els sensors llegeixen els desplaçaments correctament, es taren tots els valors al software i es comença l'assaig.

La força s'aplica de manera manual mitjançant la vara del gat hidràulic, que en arribar al desplaçament màxim, manté la càrrega mentre es torna a l'origen del desplaçament i és aquest el motiu pel qual els gràfics presenten uns cicles que cal eliminar per a una correcta avaluació dels resultats. A les figures 30 i 31 es pot apreciar el canvi de l'abans i el després del processament.

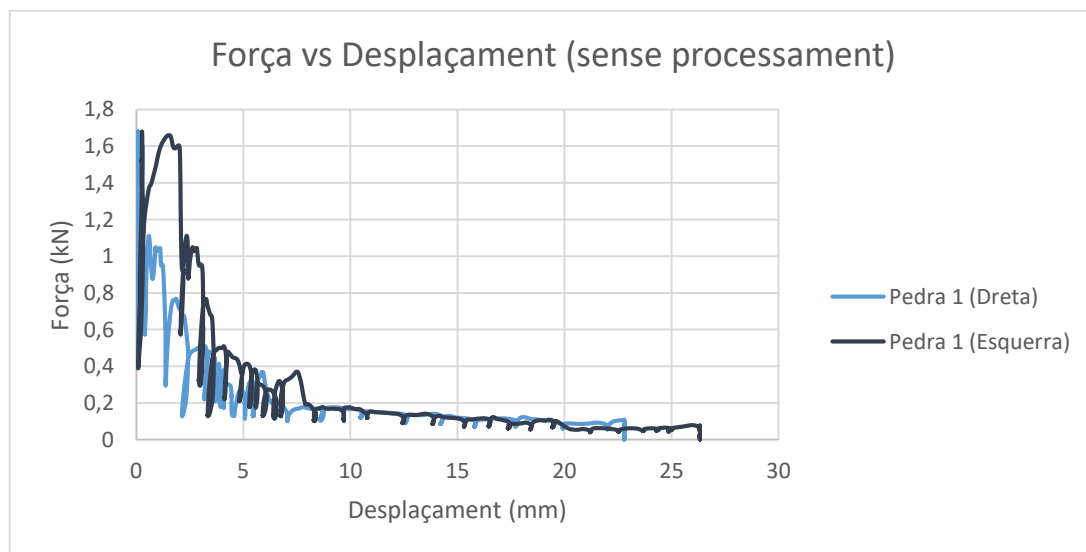


Figura 34. Dades de rasant representades sense processament

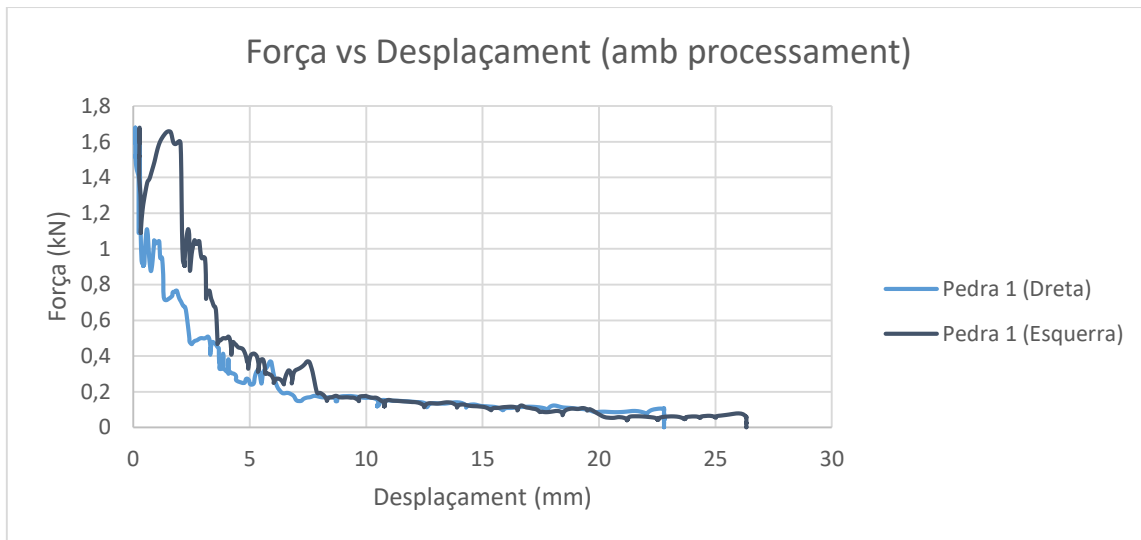


Figura 35. Dades de rasant representades amb processament

L'assaig finalitza quan el bloc de formigó se separa completament del CFRP o quan la força s'apropa al límit de la cel·la de càrrega.

6.3. Assaig de flexió

L'assaig de flexió consisteix a determinar la càrrega màxima que suporta un espècimen, quan aquest es troba recolzar per dos punts que permeten el gir però no el desplaçament mentre s'aplica una càrrega puntual al centre de l'estructura, ja que és la situació més desfavorable a la que pot estar sotmès.

L'equipament necessari per dur a terme l'assaig de flexió ha estat:

- Actuador MTS de 50 kN de rang: es troba situat al marc de càrrega del laboratori i és el que aplicarà la força sobre l'espècimen.
- Controlador: és el controlador de l'actuador i porta el software mateix del MTS, permet en control de l'actuador, així com la lectura de dades.
- 2 sensors de desplaçament LVDT amb rang de 20 mm i alta precisió (0,02% del rang, 0,004 mm): mesuren el lliscament del formigó sobre el CFRP en relació amb la força aplicada.
- 2 potenciòmetres de 100 mm de rang: són els encarregats de mesurar el desplaçament en el punt de fletxa màxima (al centre de l'estructura) i es troba fixat mitjançant una placa metàl·lica que és la que desplaça el potenciòmetre.
- 2 bandes extensomètriques de 4 fils: es troben dotades d'una resistència elèctrica de 350 ohms i permet mesurar les deformacions que pateix el CFRP en relació amb la força aplicada. Dóna les mesures en $\mu\text{m/m}$.

- Adquiridors HBM models MX840A i MX1615: s'encarrega d'enregistrar les dades que envien els diferents sensors que hi ha col·locats (LVDTs, potenciómetres i galgues), així com les dades donades pel JACK (desplaçament i força aplicada de l'actuador. Enregistra a 50Hz, que es tradueix en 50 lectures per segon.
- Ordinador equipat amb *Catman easy*: és el software encarregat de la recollida de dades de l'assaig i recull totes les dades adquirides pels adquiridors.
- Perfils d'alumini: són els encarregats de subjectar els potenciómetres al lloc indicat.
- Plaques metàl·liques: són les encarregades de subjectar els LVDTs.
- Adhesiu instantani Loctite ®: s'utilitza per a l'adherència de les plaques metàl·liques al CFRP.
- Cinta transparent

Un cop es tenen localitzats tot l'equipament necessari, es comença la preparació de l'assaig. Primer de tot es col·loquen les galgues extensomètriques a la part inferior de l'estructura. Una d'elles a la vall del perfil, i l'altra a la cresta per poder veure la diferència de comportament al llarg de l'assaig.

Per adherir les galgues, primer es prepara la superfície allisant-la amb paper de vidre i un cop és llisa es neteja amb alcohol. A continuació es transporten les galgues mitjançant l'ús de cinta transparent per evitar en contacte directe amb la pell i s'adhereixen al CFRP mitjançant l'ús d'adhesiu HBM Z70. Per la col·locació de les galgues és necessari l'ús de mascareta i ulleres de seguretat.

Un cop col·locades les galgues, es procedeix a col·locar la resta de sensors. S'adhereixen les plaques metàl·liques als extrems de l'espècimen, on es col·loquen els sensors de desplaçament LVDTs i mitjançant l'ús de perfils d'alumini, es forma l'estructura que subjecta els potenciómetres, a cada costat de l'espècimen a la part central, al costat de la placa metàl·lica que sobresurt i es col·loca entre les femelles del potenciómetre.



Figura 36. Configuració de l'assaig de flexió

Abans de començar l'assaig, es configura el mètode que seguirà l'actuador, que en aquest cas és d'un avanç de 2 mm/min i es considera la fi d'assaig quan trenca l'espècimen o quan s'arriben a 100 mm de desplaçament de l'actuador, ja que és un valor proper al rang màxim d'aquest. En aquest cas, no es té en compte el màxim de càrrega gràcies al fet, que és, conegut que les resistències dels espècimens s'esperen inferiors a 30 kN.

7. Resultats i anàlisi

A aquest apartat es troben recollides totes les dades de l'assaig de rasant i de flexió, així com l'anàlisi d'aquestes.

7.1. Resultats de l'assaig de rasant

Com s'ha explicat a l'apartat 6.2, l'assaig de rasant consta d'una força aplicada manualment mitjançant un gat hidràulic, de manera que no es fa una força constant, sinó que hi ha uns moments de descàrrega i càrrega que a l'hora de fer l'anàlisi mitjançant gràfics s'han d'eliminar.

A continuació es mostra el gràfic força vs. desplaçament per a cadascun dels casos a tractar i es comenta breument. A l'apartat d'anàlisi es farà una comparació de tots els espècimens, a partir de l'esforç tallant que suporten.

7.1.1. Cas de CFRP

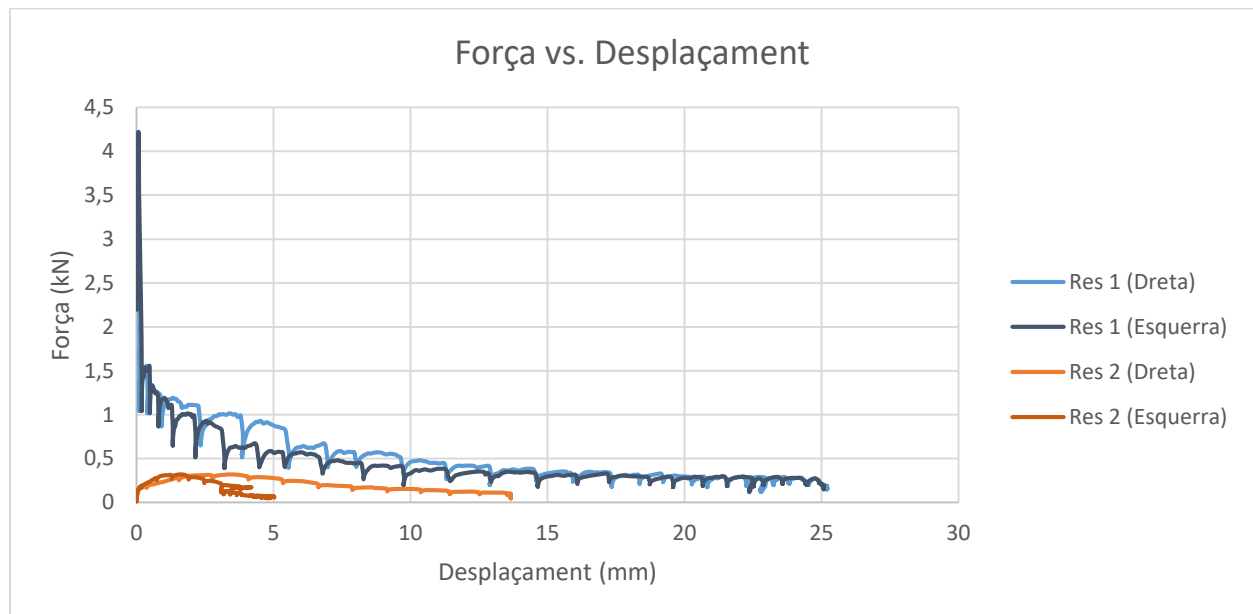


Figura 37. Gràfic Força - Desplaçament del cas Res

Per al cas de formigonat directament sobre el CFRP, es veu que els resultats són molt diferents, per al primer espècimen (color blau) arriba a una resistència de 4,22 kN amb un desplaçament del conjunt de 26 mm mentre que l'espècimen 2 (color taronja) té una resistència inferior a 0,32 kN i presenta un desplaçament inferior.

Passada la força màxima, es veu com els espècimens tenen un comportament fràgil per la important caiguda del valor de la força (d'aproximadament el 60%).

La diferència de comportament entre aquest espècimen és degut al procés constructiu:

- L'espècimen Res 1 va ser el primer construït, de manera que el seu acabat va ser més heterogeni, el CFRP presentava més zones sense resina que donava rugositat al CFRP i el formigonat també presentava coqueres i disgregació d'àrids.
- L'espècimen Res 2 va ser un dels últims a construir, ja que depenent del resultat que presentés Res 1 seria adient construir un altre per poder dur a terme la comparació o no. Al ser dels últims, el procés constructiu va millorar considerablement aconseguint un compòsit CFRP més homogeni i llis i un formigonat més uniforme.

Com que no hi ha rugositat, el formigó es desprèn del CFRP amb molta facilitat.

7.1.2. Cas de CFRP amb pedra

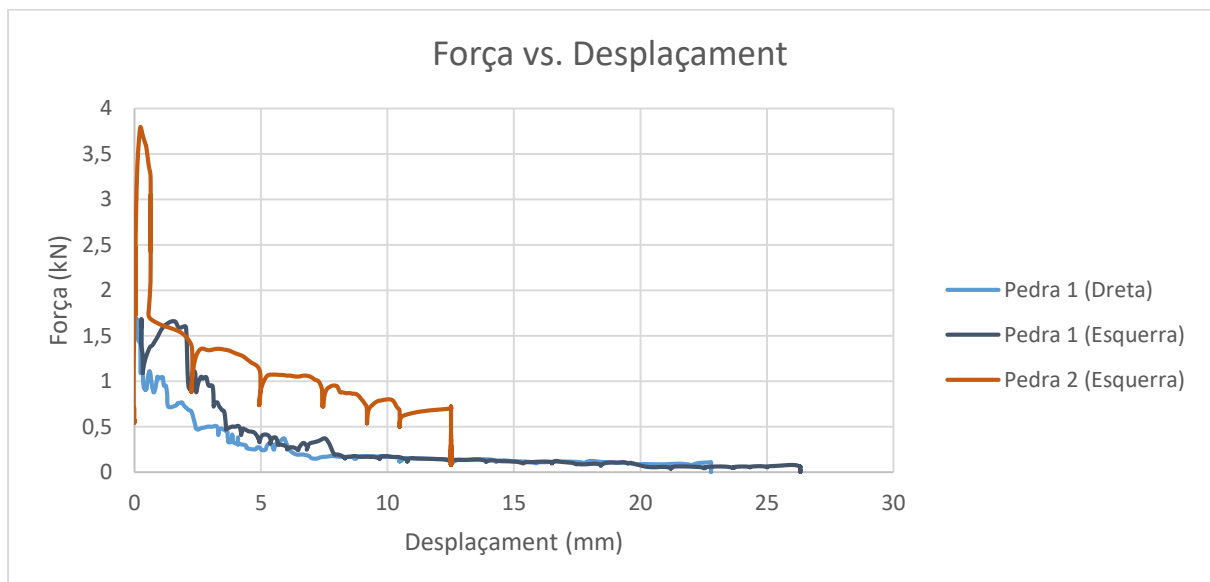


Figura 38. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra

Per aquest cas, la força màxima que suporten els espècimens és de 1,67 kN per al primer espècimen, i de 3,80 kN per al segon.

Els desplaçaments també varien, de 24 mm per a l'espècimen 1 i de 13 mm per a l'espècimen 2.

Aquesta variació es podria donar degut a la quantitat (mateixa als dos espècimens) i disposició de les pedres, on s'intenta aconseguir una disposició la més homogènia possible.

Les pedres donen més rugositat a la superfície, de manera que el formigó pot aguantar més càrrega al llarg de l'assaig, i tot i seguir presentant un comportament fràgil a la ruptura, la disminució de càrrega és inferior a l'obtinguda per al CFRP sense pedra (aprox. 40%).

7.1.3. Cas de CFRP amb pedra i malla

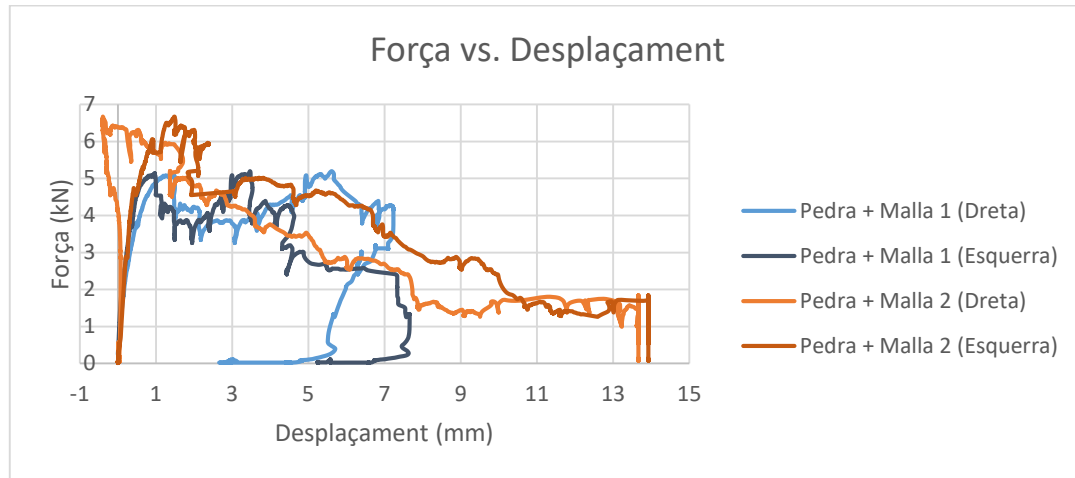


Figura 39. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Malla

En afegir la malla, es veu a la Figura 39 que el comportament de l'estructura híbrida ha canviat respecte als casos anteriors. La força màxima ha augmentat a 5,20 kN per a l'espècimen 1 i a 6,67 kN per a l'espècimen 2.

El desplaçament es redueix respecte als casos anterior, on era variava entre 13 i 27 mm, mentre que ara és inferior a 15 mm.

El comportament de l'estructura un cop s'arriba a la força màxima deixa de ser fràgil, si no que passa a tenir un comportament més dúctil, on aguanta forces més elevades durant més temps. Aquesta variació és clarament gràcies a la malla.

7.1.4. Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla

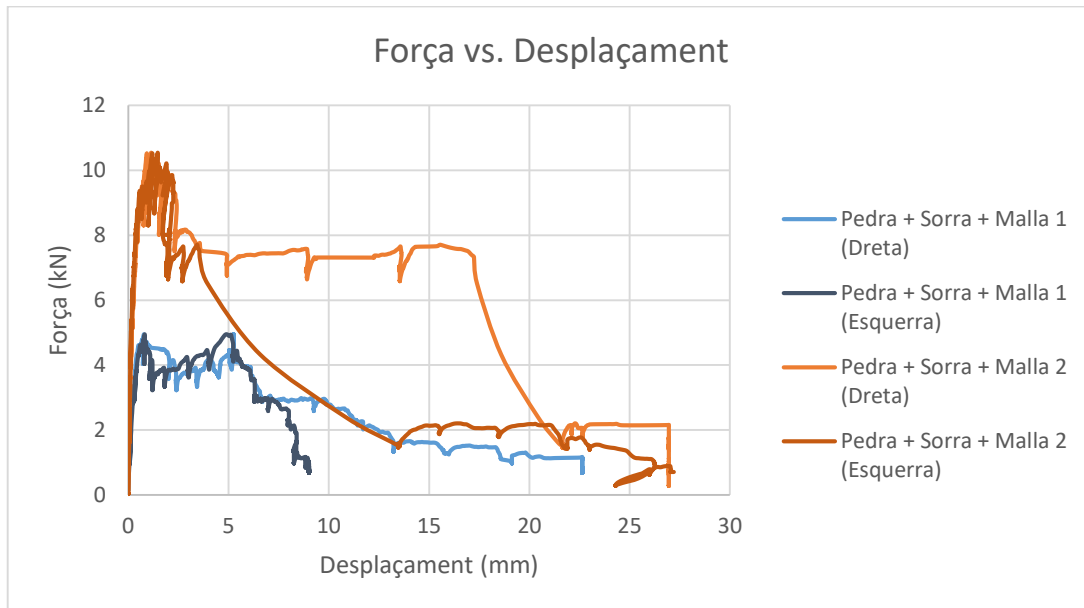


Figura 40. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla

En aquest cas s'ha afegit sorra als plans inclinats del compòsit amb la intenció d'augmentar la rugositat d'aquests.

Es veu que hi ha dos resultats diferenciats. Per a l'espècimen 1 la seva resistència és de 4,95 kN i per al segon és 10,54 kN.

Aquests resultats poden ser deguts a algun defecte del procés constructiu donant valors més petits al primer espècimen. També la quantitat i disposició de la sorra pot fer que en comptes d'aportar rugositat per augmentar l'adherència del formigó, una quantitat excessiva a diferents punts faci que afavoreixi el lliscament del formigó sobre el CFRP.

No és apreciable l'efecte que té la sorra sobre els espècimens.

7.1.5. Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla inclinada 45°

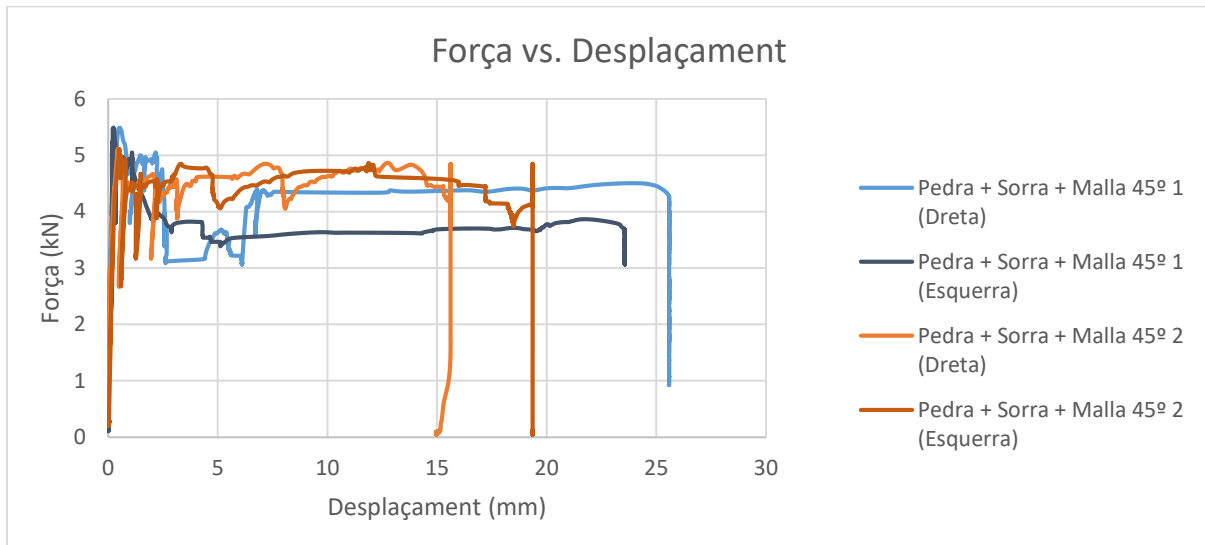


Figura 41. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla 45°

A aquests espècimens, s'ha inclinat la malla de fibra de vidre 45°, de manera que en comptes de tenir la fibra en la direcció de la força i perpendicular, es tindrà les dues fibres 45° respecte a la força.

Primer de tot, durant l'experimentació s'ha patit un aixecament del CFRP, la zona central s'ha elevat uns centímetres mentre que els vèrtexs de l'estructura mantenen el contacte amb el terra, a l'hora d'aplicar la força, això és clarament degut a la inclinació de la malla. Per aquest motiu es va haver de tornar a començar l'assaig. Les dades de la Figura 41, corresponen al primer intent ja que les dades del segon intent no són completes i presenten variacions en el comportament de l'estructura.

La força màxima a la qual s'ha arribat ha estat 5,49 kN i 5,10 kN respectivament. El desplaçament de l'espècimen 1 és superior al de l'espècimen 2, que és coherent, ja que ha resistit més força.

En comparació amb el cas anterior (pedra amb sorra i amb malla recta) es pot observar com el comportament dúctil que aporta la malla és superior a aquest cas, ja que la disminució de força un cop superada la força màxima és inferior i suporta més càrrega durant més desplaçament. Finalment, es veu que el comportament és diferent, ja que a la Figura 40 es veu clarament com la força va disminuint a mesura que avança el desplaçament fins al trencament total, mentre que a l'inclinar la malla, la força que aguanta és superior durant un període més llarg.

La inclinació de la malla manté la resistència a càrrega màxima durant un període més llarg en comparació de la malla recta, que arriba a un valor més elevat de càrrega però que disminueix un 30%.

7.2. Anàlisi dels resultats de l'assaig de rasant

Després de l'anàlisi inicial, realitzat mirant el comportament de l'estructura híbrida en cadascun dels casos, ara s'entrarà més en detall tenint en compte les propietats dels materials així com els esforços que suporten.

A la Taula 12, es poden veure les càrregues màximes de tots els espècimens amb el seu desplaçament màxim, també es comenten els mètodes de trencament de cadascun dels espècimens.

Taula 10. Comparació dels assaigs de rasant

Cas	Força (kN)	Desplaçament (mm)		Avanç del bloc de formigó	Mètode de trencament
		Sensor dret	Sensor esquerre		
Res 1	4,22	25,21	25,09	Simultani a ambdós costats.	Lliscament del formigó sobre el CFRP. Separació total.
Res 2	0,32	13,66	5,02	Presenta un lleuger gir en el sentit de les agulles del rellotge.	Lliscament del formigó sobre el CFRP. Separació total.
Pedra 1	1,67	22,80	26,33	Presenta un lleuger gir en sentit contrari a les agulles del rellotge.	Lliscament del formigó sobre el CFRP. Separació total.
Pedra 2	3,80	-	12,52	Simultani a ambdós costats. (Observació durant l'experimentació)	Lliscament del formigó sobre el CFRP. Separació total.
Pedra + Malla 1	5,20	7,23	7,66	Simultani a ambdós costats.	Lliscament del formigó sobre el CFRP, trencament de la fibra de vidre.
Pedra + Malla 2	6,67	13,67	13,93	Simultani a ambdós costats.	Lliscament del formigó sobre el CFRP, trencament parcial del CFRP que adhereix la fibra de vidre i trencament parcial de la fibra de vidre.
Pedra + Sorra + Malla 1	4,95	22,64	9,01	Presenta un lleuger gir en sentit contrari a les agulles del rellotge	Trencament de la fibra de vidre
Pedra + Sorra + Malla 2	10,54	26,96	27,20	Presenta un lleuger gir en el sentit de les agulles del rellotge	Trencament de la fibra de vidre
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	5,49	25,59	23,57	Simultani a ambdós costats.	Trencament de la fibra de vidre i separació de CFRP que l'adhereix.
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	5,11	15,62	19,36	Presenta un lleuger gir en el sentit de les agulles del rellotge	Trencament de la fibra de vidre i separació de CFRP que l'adhereix.

A partir de les càrregues màximes, i tenint en compte la superfície de contacte de la força aplicada amb el formigó, és possible calcular l'esforç tallant que està suportant l'estructura.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (1)$$

On τ és l'esforç tallant en MPa, P és la força en N i A és la superfície de contacte entre el formigó i el CFRP, que són 94400 mm².

A la Taula 11 es veuen els valors calculats del tallant, tenint en compte que la superfície de contacte és una circumferència de radi 5,3 mm (corresponent al cilindre del gat hidràulic).

Taula 11. Càlcul del tallant mitjà

Cas	Força (N)	Esforç tallant (kPa)	Esforç tallant mitjà (MPa)	Desviació estàndard (MPa)
Res 1	4220	44,70	24,05	29,21
Res 2	320	3,39		
Pedra 1	1670	17,69	28,97	15,95
Pedra 2	3800	40,25		
Pedra + Malla 1	5200	55,08	62,87	11,01
Pedra + Malla 2	6670	70,66		
Pedra + Sorra + Malla 1	4950	52,44	82,04	41,87
Pedra + Sorra + Malla 2	10540	111,65		
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	5490	58,16	56,14	2,85
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	5110	54,13		

A la Figura 42, s'aprecia clarament la variació entre els valors d'un mateix cas que han estat resultat de l'experimentació, per aquest motiu es calculen els valors mitjans.

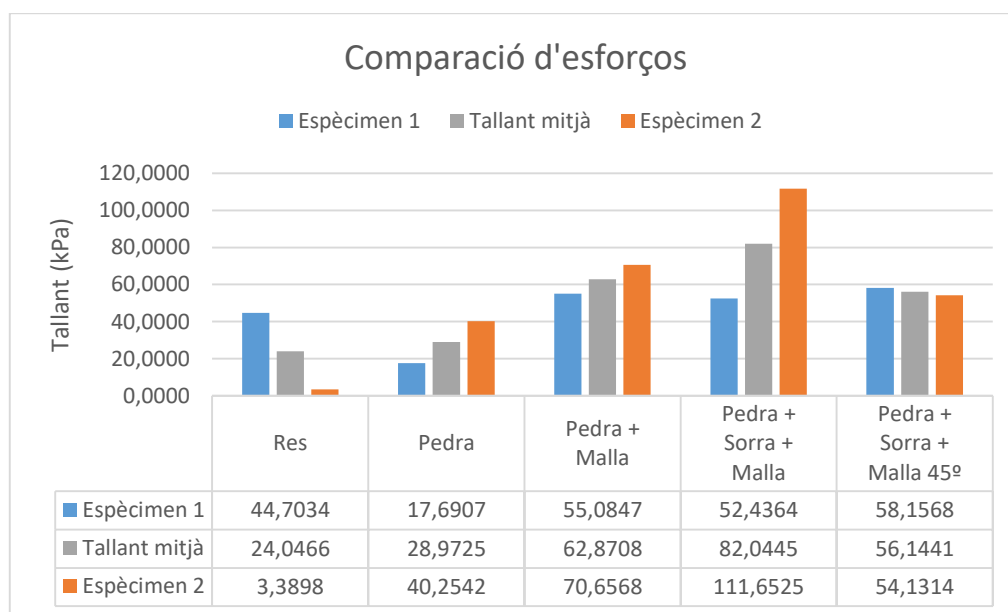


Figura 42. Gràfic de tallant comparatiu

Mirant els valors mitjans, és clarament apreciable com s'incrementa la resistència a tallant de l'estructura a mesura que s'afegeixen elements per a una millor interacció.

- Efecte de l'experimentació

Primer de tot, remarcar la variació dels resultats a causa de l'equipament disponible per a la realització d'aquest assaig.

Com s'explica a l'apartat 6.2, l'assaig consta d'una forma puntual al centre de la secció de l'estructura dut a terme manualment amb un gat hidràulic. Això ha provocat a diversos assajos que s'observés casos en els quals hi ha una variació en els desplaçaments laterals d'un mateix espècimen, indicant un gir.

Aquests espècimens han sigut els que menys esforç tallant han obtingut per al seu cas, encara que el mètode de trencament sigui el mateix.

- Efecte de l'addició de pedra

En afegir la pedra la resistència s'incrementa lleugerament gràcies a la rugositat que aquesta aporta, tot i que s'ha de tenir en compte que la variació de valors en el cas de formigonat sobre CFRP és deu, com ja s'ha comentat, a una millora al procés de producció que si s'industrialitzés, s'aproparia al comportament del segon espècimen.



Figura 43. Cas de formigonat sobre CFRP (Res): Espècimen 1 (esquerra), espècimen 2 (Dreta)

Tenint en compte aquesta suposició, en afegir la pedra l'estructura és capaç de suportar un esforç tallant considerablement major, ja que també s'ha vist als diferents espècimens que contenen pedra, com durant el trencament algunes queden adherides al CFRP mentre que altres han sigut arrencades amb el formigó.

Això és un clar resultat d'una millor interacció entre el formigó i CFRP gràcies a l'addició de pedra.



Figura 44. Separació no homogènia de la pedra del CFRP

- Efecte de l'addició de malla

L'addició de la malla de vidre a l'estructura, provoca que el tallant s'incrementi fins a obtenir aproximadament el doble de resistència, això és degut a l'esforç que fa la malla per a mantenir l'estructura treballant com un bloc tot i que el formigó comenci a presentar esquerdes, que segons s'han vist als gràfics de cada cas, aporten un comportament més dúctil, en comparació al comportament fràgil dels casos Res i Pedra.

Els espècimens amb malla han presentat diversos mètodes de trencament:

- Trencament de la fibra de vidre: on hi ha part de la fibra que es manté adherida al CFRP mentre que altra ha sigut arrencada amb el despreniment del formigó.
- Despreniment de la làmina de CFRP: Tota la làmina de CFRP es desprèn amb el formigó quan aquest es separa totalment del CFRP.



Figura 45. Mètodes de trencament: Trencament de la fibra de vidre (esquerra), despreniment de la làmina de CFRP (dreta)).

Els espècimens que presenten trencament de la malla de vidre, tinguin o no despreniment de la làmina de CFRP, tenen una resistència més elevada.

- Efecte de l'adició de sorra

La variació en la resistència a tallant degut a l'adició de sorra, es treu mitjançant la comparació entre els casos Pedra + Malla i Pedra + Sorra + Malla.

En aquest cas s'ha vist com, per valors mitjans, l'adició de sorra ha provocat un augment en la resistència a tallant d'un 30% aproximadament. Tot i així, el cas Pedra + Sorra + Malla és el que presenta la desviació estàndard més elevada de tota l'experimentació, de manera que els seus valors són poc fiables.

En conclusió, no és possible determinar l'efecte de l'adició de sorra als espècimens.

- Efecte de la inclinació a 45° de la malla de vidre

La inclinació de la malla de vidre a 45° no presenta un augment en la seva resistència a tallant, respecte als altres casos amb malla, encara que aquesta sigui recta. És més, s'ha donat que el seu tallant mitjà és inferior que el dels altres casos.

Això possiblement és degut al fet que les fibres tenen més resistència si la força s'aplica en la direcció de la fibra. En el cas de la malla recta on la resistència s'aplica en la direcció de les fibres (tot i haver-hi una part que està totalment perpendicular a la força i per tant la seva resistència serà molt inferior) la resistència que aporten és superior que totes les fibres treballin a 45°.

Però es veu com la inclinació de la malla dona més ductilitat, ja que es capaç d'aguantar forces properes a la màxima durant un període de temps major.

Taula 12. Resum de l'efecte de cada un dels elements d'adherència

Cas	Comparació entre casos	Efecte
Pedra	Res – Pedra	Augment de la rugositat que es transforma en una millor adherència del formigó.
Malla	Pedra – Pedra + Malla	Canvi en el comportament de l'estructura, que passa a tenir un comportament dúctil, suportant càrregues majors durant un període més llarg.
Sorra	Pedra + Malla – Pedra + Sorra + Malla	No és possible extreure una conclusió sobre l'efecte de la sorra.
Malla inclinada 45°	Pedra + Sorra + Malla – Pedra + Sorra + Malla 45°	Aporta més ductilitat però menys resistència a tallant.

7.3. Resultats de l'assaig de flexió

Amb les dades recollides mitjançant els sensors disposats tal i com s'explica a l'apartat anterior, es decideix representar els següents gràfics:

- Força vs. desplaçament de l'actuador
- Moment vs. deformacions de les galgues extensomètriques

A partir dels quals, es permet veure quin ha estat el comportament de l'estructura a mesura que s'anava incrementant la càrrega aplicada.

Els gràfics corresponen als 2 assaigs els quals són del mateix cas d'estudi de la interacció, i en el cas de les deformacions de les galgues extensomètriques a cada gràfic es troben les dues galgues de cada assaig.

7.3.1. Cas de CFRP amb pedra

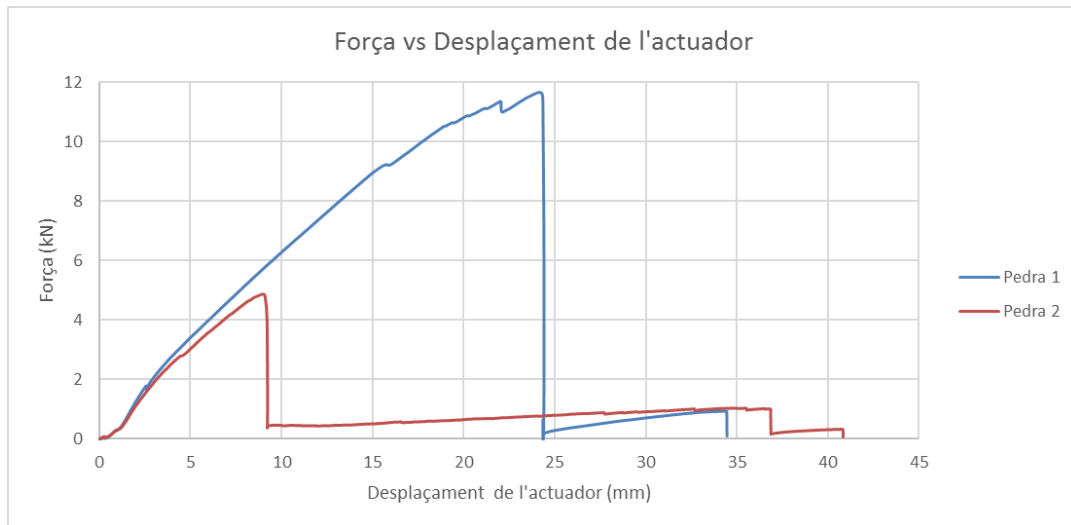


Figura 46. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra

A aquest cas, es veu com hi ha una variació entre els dos valors resultants, en el cas del primer espècimen, arriba fins 11,66 kN mentre que el segon només resisteix fins a 4,87 kN.

Un cop assolida la força màxima que aguanta l'estructura, aquesta pateix una disminució de resistència d'aproximadament el 90% respecte a la força màxima, que dona la sensació d'un comportament fràgil.

A més, inicialment es veu com hi ha variacions del pendent de la corba entre l'origen i el punt de màxima càrrega, que es deuen a la fissuració del formigó. Es compararà aquest canvi de pendent amb el comportament de les galgues extensomètriques per veure si hi ha relació.

Es considera per al cas Pedra 1 que la variació de pendent és produeix a 0,75 kN (Figura 46), que correspon a un moment de 0,38 kN·m. Mirant el gràfic que relaciona el moment amb les galgues extensomètriques per aquest cas (Figura 47), i es veu que també pateix un canvi de pendent al moment esmentat, on passa a tenir un pendent menys pronunciat.

A més, es veu clarament el comportament de les galgues, la galga col·locada a la part inferior de l'estructura treballa a tot moment a tracció, mentre que la galga que es troba a la cresta, un cop assolit la càrrega màxima redueix les deformacions degudes a tracció i comença a comprimir-se. Això és degut a un desplaçament de l'eix neutre de l'estructura a mesura que el formigó cedeix a tracció.

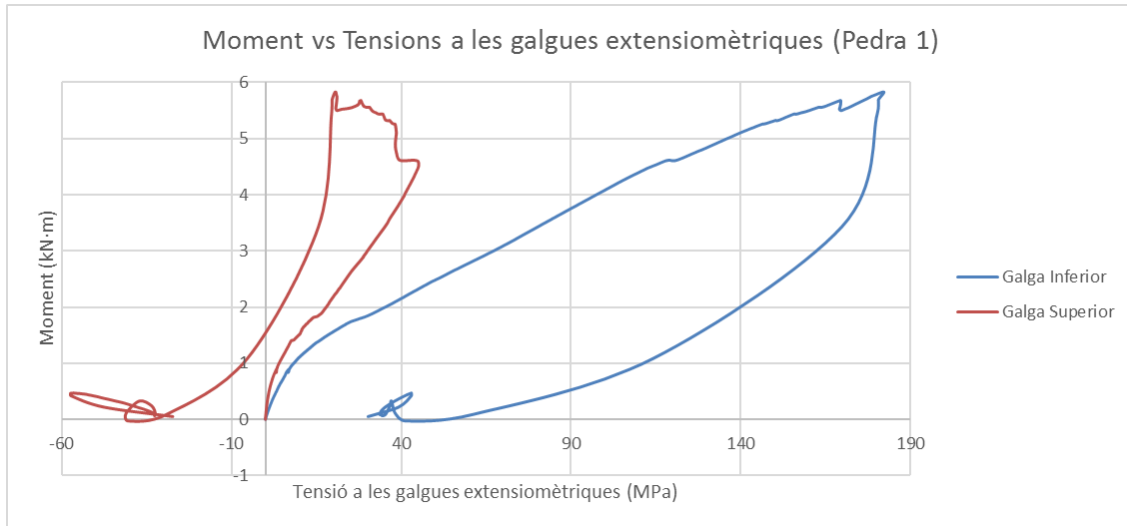


Figura 47. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra 1

Per al cas de Pedra 2 es produeix a 0,76 kN que correspon a un moment de 0,38 kN·m, i com al cas anterior, les galgues extensiomètriques també pateixen una variació del pendent de la corba. El comportament de les galgues també és l'esperat. Les deformacions són inferiors ja que aquest espècimen aguanta menys càrrega.

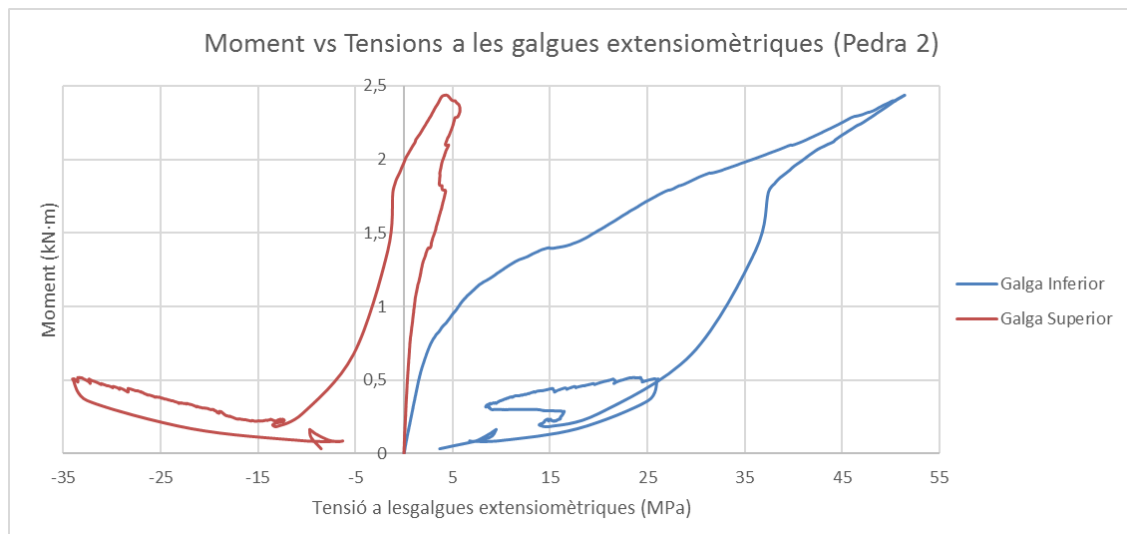


Figura 48. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra 2

Tenint en compte que a l'inici de l'assaig, es considera l'estructura com un únic conjunt que capaç de transmetre els esforços correctament, és possible que aquest canvi de pendent indiqui un canvi en la manera en què es transmeten els esforços entre els dos materials.

Per aquest motiu, es mira si aquest comportament es reproduïx també en els altres casos.

7.3.2. Cas de CFRP amb pedra i malla

A causa de problemes amb el programa informàtic, en aquest cas els gràfics Força vs. Desplaçament dels dos casos estan per separat.

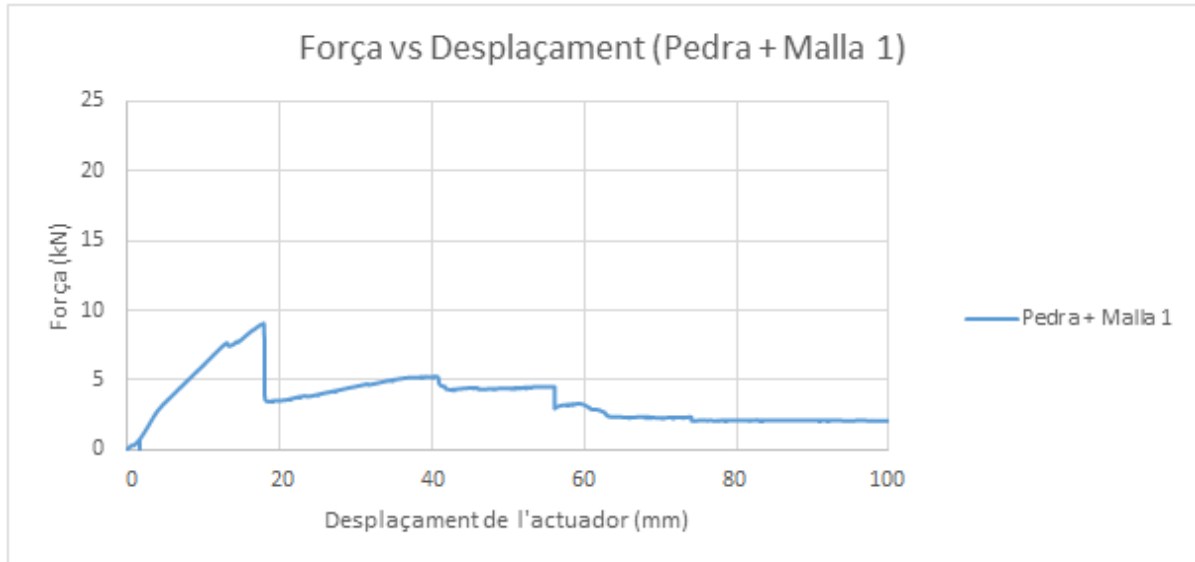


Figura 49. Gràfic Força - Desplaçament de l'espècimen Pedra + Malla 1

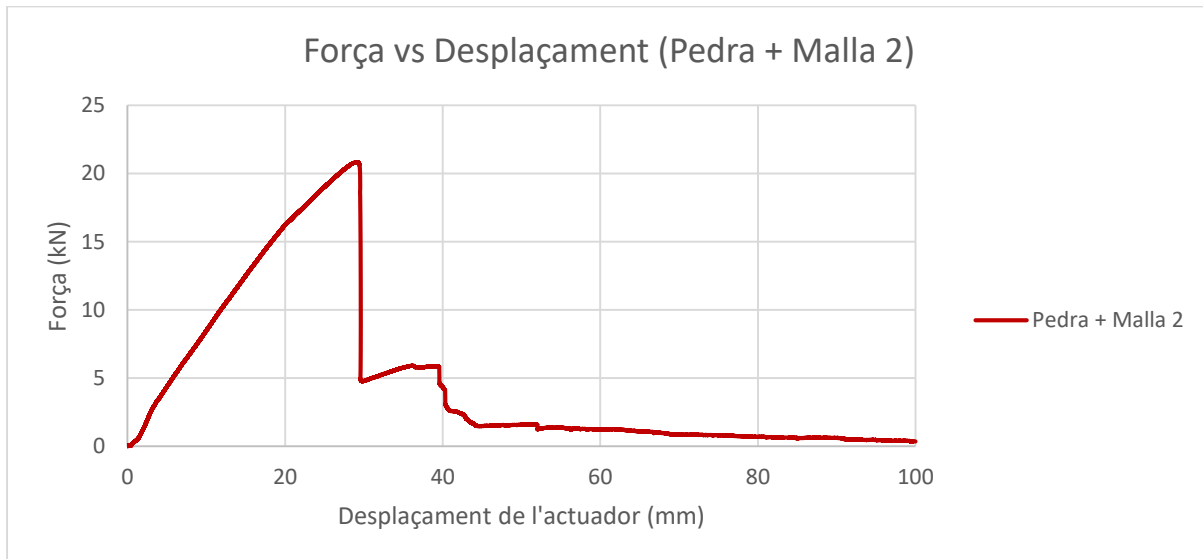


Figura 50. Gràfic Força - Desplaçament de l'espècimen Pedra + Malla 2

Per al cas de Pedra + Malla 1, es veu com la càrrega màxima que suporta és inferior a 10 kN però a continuació la reducció de càrrega és del 60% tot i que dona la sensació d'un comportament dúctil, ja que torna a augmentar lleugerament la càrrega, mentre que al segon espècimen, la càrrega màxima és 20,83 kN i presenta una reducció de la càrrega del 75% que té un comportament més fràgil, ja que pràcticament no recupera la càrrega perduda i la força es redueix ràpidament.

També és apreciable en canvi de pendent a l'inici dels assajos, que en el cas de Pedra + Malla 1 correspon a una força de 2,53 kN i per a l'espècimen Pedra + Malla 2 és de 2,56 kN, a partir d'on el formigó comença a presentar fissures.

L'espècimen Pedra + Malla 1 no ha estat realitzat durant aquest projecte, sinó que ha estat part d'un estudi previ i s'aprofiten les dades per poder realitzar una anàlisi amb l'espècimen 2, que sí que ha estat fabricat durant el projecte. Per culpa d'això no es poden saber les característiques de l'espècimen 1, més enllà de la resistència a compressió que sí que ha estat rebuda, llavors és possible que gràcies a defectes durant la fabricació la seva resistència hagi estat minvada. També l'experimentació ha estat diferent de la utilitzada durant aquest estudi, i per tant presenta diferències en els sensors utilitzats, ja que només es va col·locar una galga extensiomètrica a la part inferior de l'espècimen, de manera que no podem veure la variació en el comportament de les dues galgues.

A la Figura 51 es veu clarament com la galga inferior treballa en tot moment a tracció, tot i que passada la càrrega màxima, aquestes deformacions es redueixen. També s'aprecia en canvi en el pendent d'aquesta, per a un moment d'1,27 kN·m.

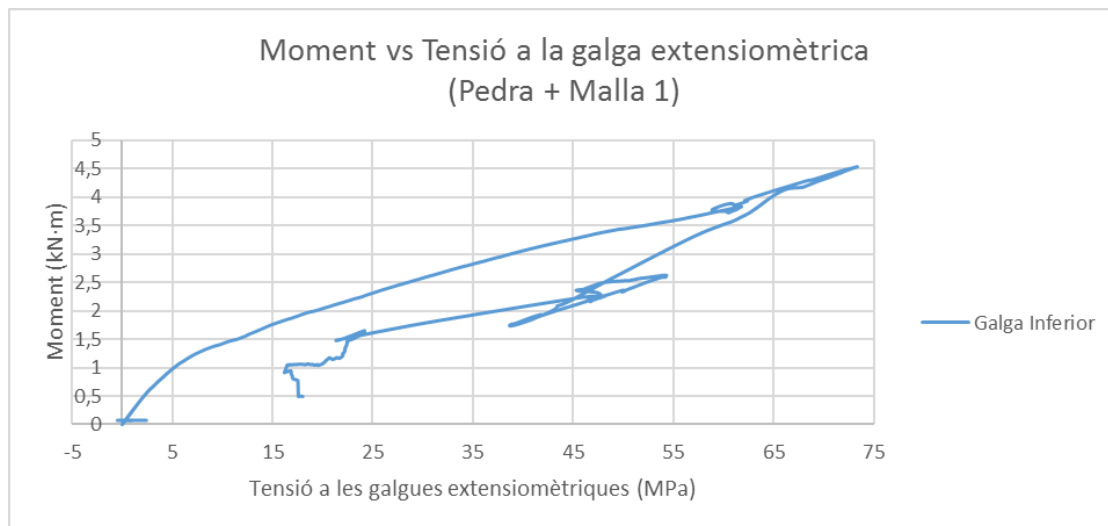


Figura 51. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Malla 1

Per al cas de l'espècimen 2, el comportament de les galgues és l'esperat, amb la galga inferior en tot moment treballant a tracció, mentre que la galga superior un cop arribat al moment màxim tendeix a comprimir-se. També és clarament apreciable la linealitat entre l'inici de l'assaig fins als 1,28 kN·m.

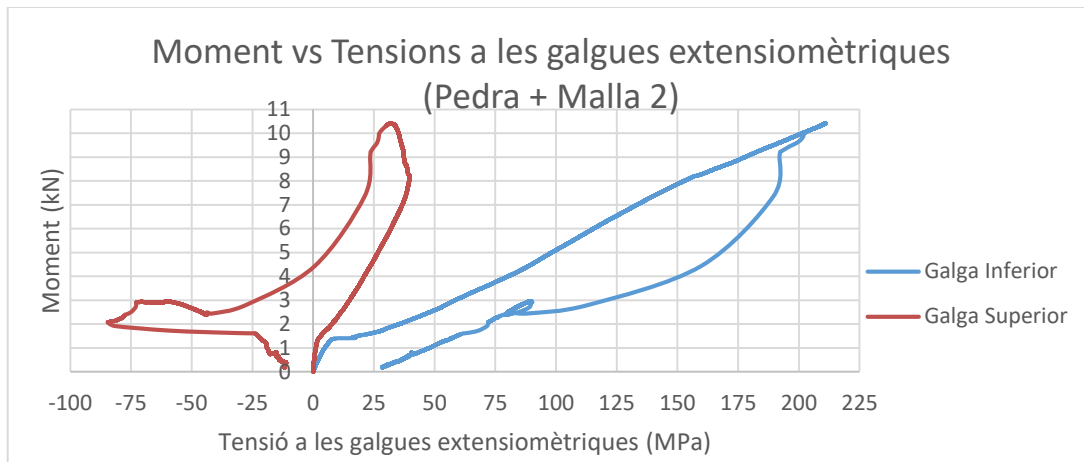


Figura 52. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Malla 2

7.3.3. Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla

Aquest cas és el cas anterior però amb l'addició de sorra als plans inclinats del perfil de CFRP per augmentar la rugositat i per tant l'adherència del formigó.

A l'observar la Figura 53, primer de tot es veu la diferència que hi ha hagut entre els dos espècimens. El primer espècimen arriba fins una càrrega de 4,14 kN mentre que el segon arriba fins una càrrega de 7,55 kN.

Es veu com el comportament després de la ruptura també és diferent, ja que el primer espècimen pateix una disminució d'aproximadament el 50% de la càrrega, però la torna a augmentar i la manté fins al final de l'assaig. L'espècimen 2 pateix una disminució del 40% que augmenta lleugerament i manté durant un petit període, però a continuació torna a reduir-se sobtadament un 40% que es va reduint fins a acabar l'assaig.

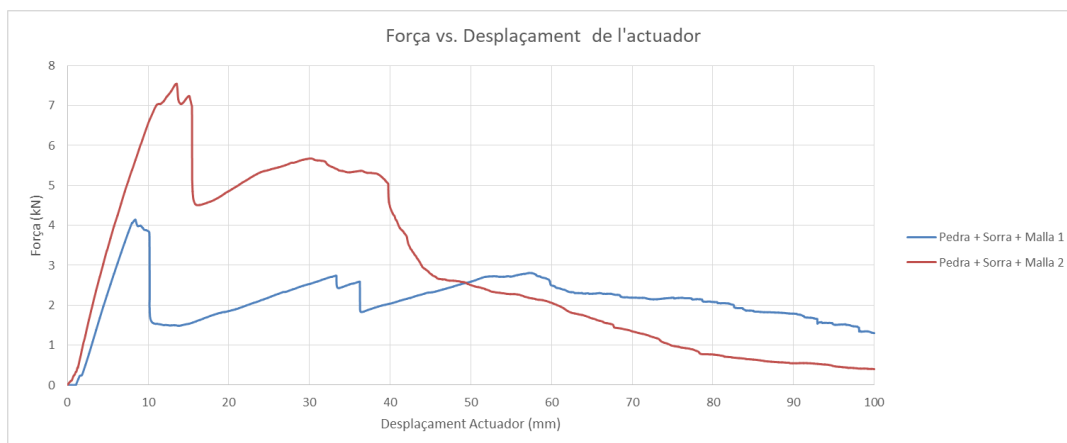


Figura 53. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla

La linealitat inicial, en aquest cas és apreciable fins a 1,65 kN per a l'espècimen 1 i fins a 1,13 kN per a l'espècimen 2, que és a partir del moment on el formigó comença a presentar fissures.

Mirant les gràfiques de galgues extensiomètriques corresponents a cada cas, es veu com la linealitat de les mateixes coincideix amb la linealitat del gràfic de força.

També el comportament dels dos espècimens és l'esperat, on la galga inferior treballa en tot moment a tracció mentre que la galga superior un cop assolit la càrrega màxima tendeix a treballar a compressió.

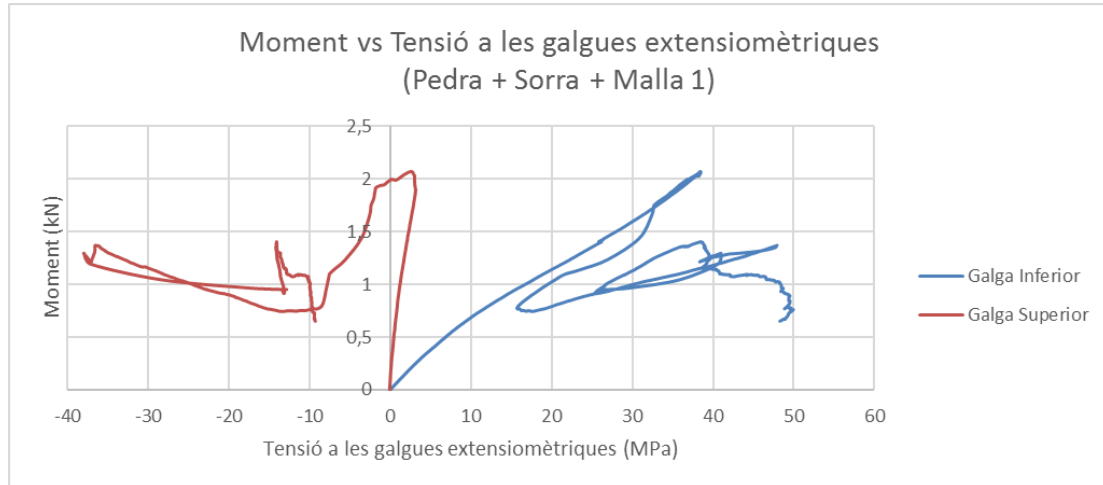


Figura 54. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Sorra + Malla 1

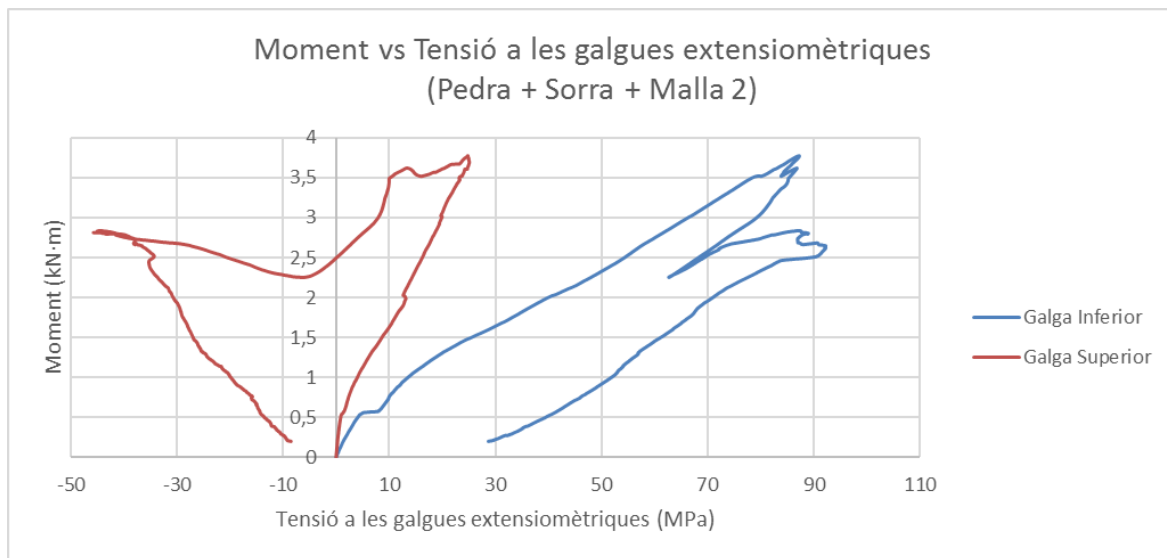


Figura 55. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Sorra + Malla 2

És evident que una major càrrega implica un major nivell de deformacions i per tant tensions tant de tracció com de compressió més elevades.

7.3.4. Cas de CFRP amb pedra, sorra i malla inclinada 45°

Finalment el cas de malla inclinada, que varia respecte a l'anterior a tenir la malla inclinada a 45°, de manera que les fibres de la malla estan a 45° respecte a la força aplicada i per tant es suposa una millor repartició de la càrrega.

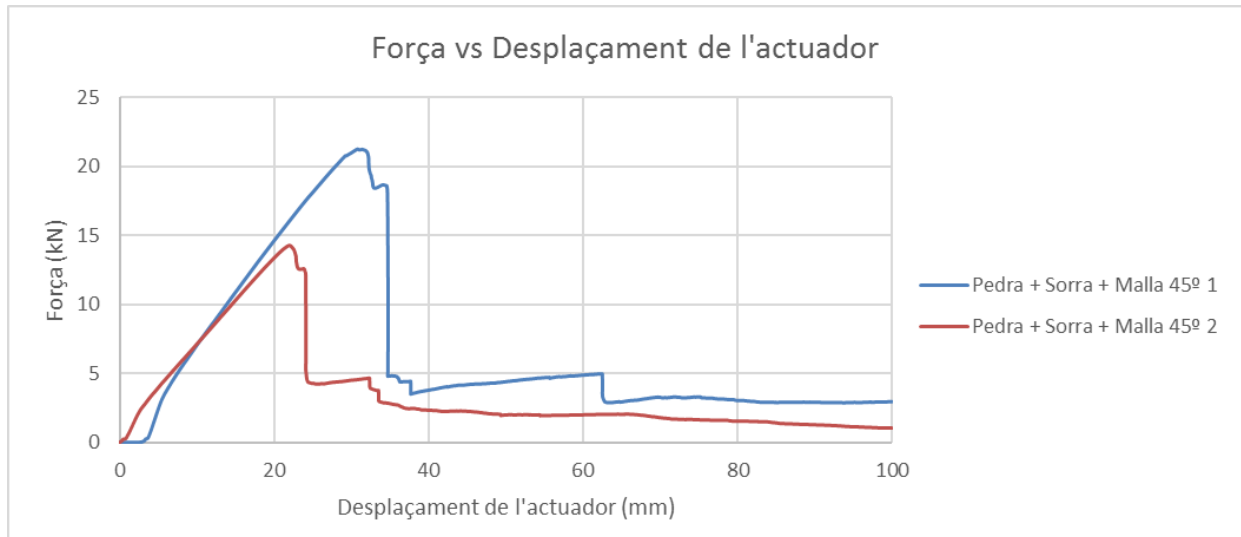


Figura 56. Gràfic Força - Desplaçament del cas Pedra + Sorra + Malla 45°

A la Figura 56, es veu la força que suporten els espècimens. El cas de l'espècimen 1 resisteix fins a una càrrega màxima de 21,27 kN i pateix una disminució de càrrega del 75% que es redueix lleugerament fins a la finalització de l'assaig. Per a l'espècimen 2, la càrrega màxima és de 14,28 kN i també presenta una reducció de càrrega sobtada després d'assolir la càrrega màxima, en aquest cas del 70% que es va reduint lleugerament fins a la fi de l'assaig.

En comparació amb el cas anterior on la malla era recta, aquest cas presenta un comportament més fràgil després del trencament.

Seguint la línia dels altres casos, presenta una linealitat inicial fins als 1,09 kN·m l'espècimen 1 i fins als 0,95 kN·m l'espècimen 2, que coincideixen amb el canvi de pendent que s'observa als següents gràfics, a causa de la fissuració del formigó.

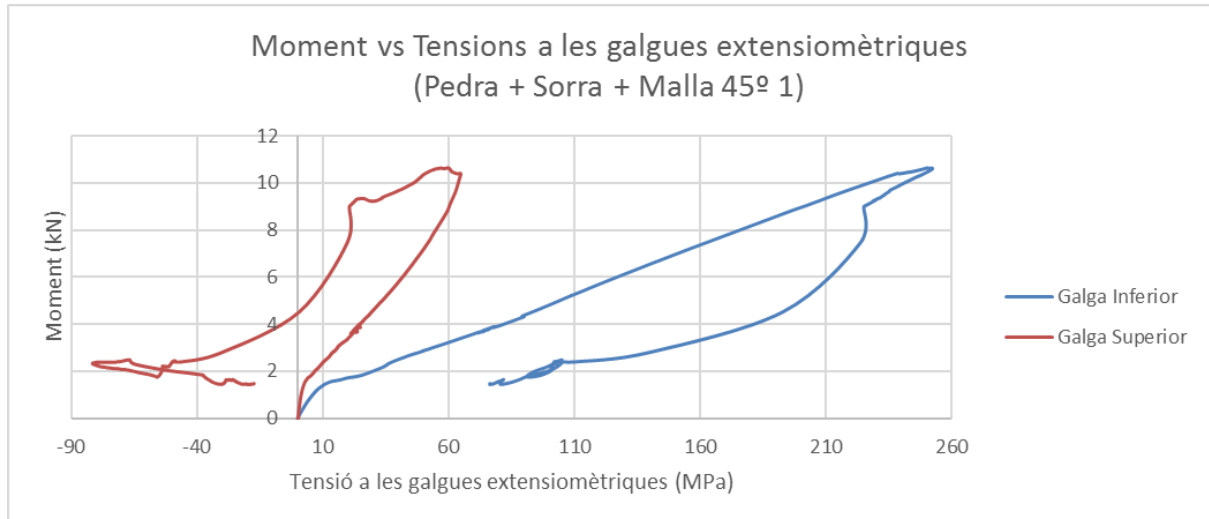


Figura 57. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Sorra + Malla 45° 1

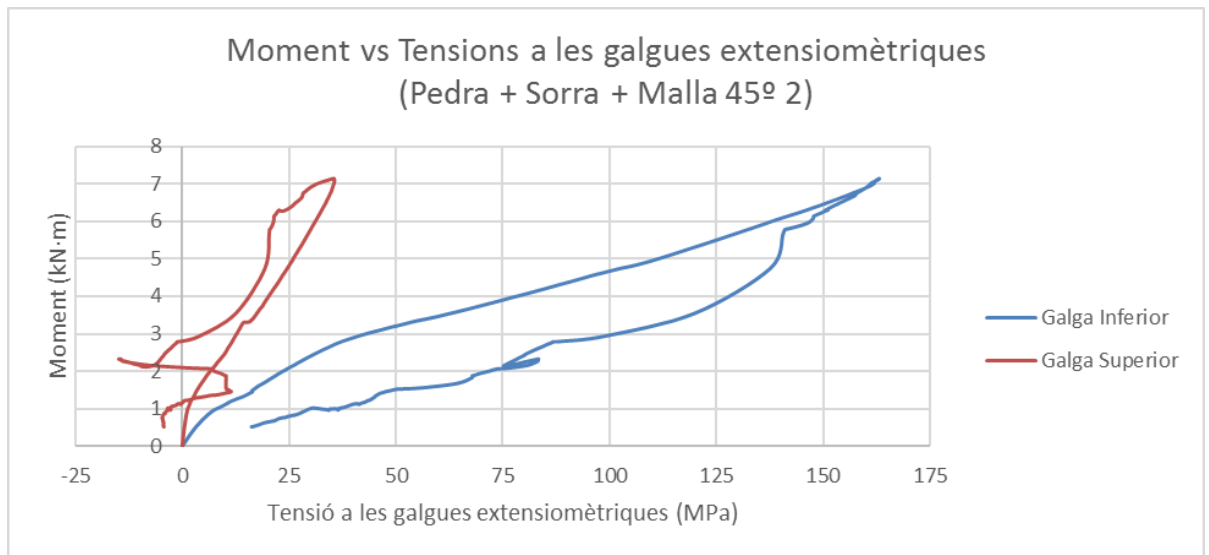


Figura 58. Gràfic Moment - Tensió de l'espècimen Pedra + Sorra + Malla 45° 2

El comportament de les galgues extensiomètriques és l'esperat, on la galga superior tendeix a comprimir-se un cop passada la càrrega màxima i la galga inferior està sotmesa a tracció en tot moment.

7.4. Anàlisi dels resultats de l'assaig de flexió

Amb els resultats obtinguts a l'apartat anterior, després d'haver analitzat la relació entre la forma en què varia la força al llarg del desplaçament i la tensió que suporten les galgues extensiomètriques en relació amb la càrrega, s'estudiarà analíticament les dues zones més característiques.

- La linealitat inicial: al ser a l'inici de l'assaig, se suposa que l'estructura pot transmetre la totalitat dels esforços i per tant es comporta com un únic bloc, de manera que se

suposa aplicable la teoria de l'homogeneïtzació, per calcular les tensions a les diferents zones de l'estructura.

- **Trencament:** El punt de càrrega màxima. Tenint en compte les característiques dels materials, se suposarà una distribució d'esforços de l'estructura i es calcularà el moment que suporten per comparar-lo amb el moment experimental.

Finalment es farà una anàlisi del comportament de l'estructura en funció dels casos d'interacció entre CFRP i formigó per determinar quins elements provoquen una millora en la interacció dels dos elements principals.

7.4.1. Estudi de la primera linealitat

Com s'ha comentat breument als diferents gràfics, tots presenten una linealitat inicial entre la càrrega i el desplaçament que, suposadament, coincideix amb el treball de l'estructura com a un únic bloc, i permet aplicar el teorema de l'homogeneïtzació.

Per estudiar-ho s'agafen els valors de deformació de les galgues extensomètriques al primer punt d'inflexió que hi ha a les gràfiques moment vs. tensió de les galgues, que correspon al punt on hi ha un canvi en la linealitat entre càrrega i desplaçament.

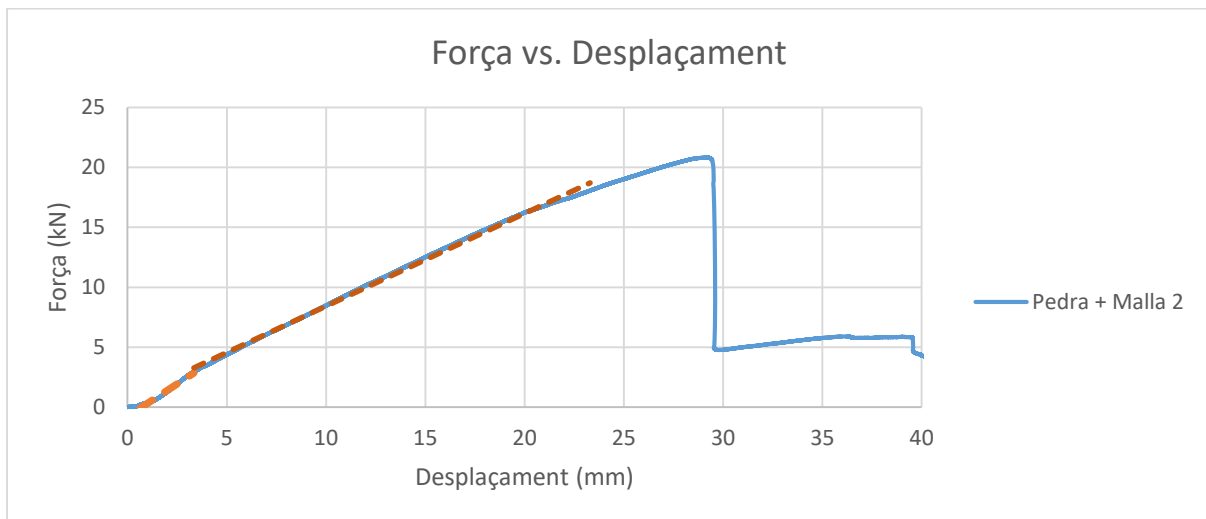


Figura 59. Canvi de pendent a la corba Força - Desplaçament

A la Figura 59, es reflecteix clarament el canvi de pendent que pateix la corba a l'inici de l'assaig, que és on degut a les fissures que apareixen al formigó, l'estructura deixa de treballar com un únic element. Traçant una línia de tendència d'aquesta zona, es veu que el coeficient d'ajust és molt proper a la unitat, afirmant la nostra hipòtesi.

A la Taula 13, es troben els punts últims d'aquesta linealitat per a cada assaig.

Taula 13. Punts últims de la linealitat inicial

Espècimen	Resistència a compressió del formigó (MPa)	Deformacions (µm/m)		Punts Inflexió gràfica F (kN)
		Superior	Inferior	
Pedra 1	19,0	13,55	62,80	0,75
Pedra 2	20,8	5,39	24,84	0,75
Pedra + Malla 1	20,0	-	164,75	2,53
Pedra + Malla 2	22,6	36,17	147,89	2,56
Pedra + Sorra + Malla 1	16,4	6,23	109,86	1,65
Pedra + Sorra + Malla 2	20,4	12,99	63,95	1,13
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	20,0	22,45	93,29	2,18
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	20,9	18,06	114,30	1,91

A continuació es calcula, a través de la llei de Hooke, les tensions a les quals estan sotmeses la cresta i la vall del CFRP.

$$\sigma = E_{CFRP} \cdot \varepsilon \quad (2)$$

El valor del mòdul de Young del CFRP, s'ha seleccionat a través de la bibliografia [21], on un CFRP de la nostra configuració (0º-90º-0º) té un valor aproximat de 90.000 MPa, tot i això s'ha seleccionat un valor de 45.000 MPa a causa del mètode i coneixement a l'hora de fabricar-ho, ε és la deformació (adimensional) i σ és la tensió en MPa.

Aquestes tensions es compararan amb la tensió màxima a tracció que és capaç de resistir el formigó.

Per calcular la tensió màxima de tracció, tal com diu l'article 39 de l'EHE [22], s'utilitza l'expressió:

$$\sigma_f = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_c^2} \cdot 0,7 \quad (3)$$

On σ_f és la tensió màxima a tracció, f_c és la resistència a compressió donada per l'escleròmetre (MPa) i 0,7 és un factor de correcció donat que es treballa amb una estructura mixta.

A la Taula 14 es recullen les tensions tant a la cresta com a la vall del CFRP i la tensió màxima del formigó.

Taula 14. Tensió de tracció del CFRP i tensió de tracció màxima del formigó

Espècimen	Tensió de tracció superior del CFRP (MPa)	Tensió de tracció inferior del CFRP (MPa)	Tensió màxima a tracció del formigó (MPa)
Pedra 1	0,59	2,79	1,50
Pedra 2	0,24	1,11	1,59
Pedra + Malla 1	-	7,41	1,55
Pedra + Malla 2	1,63	6,66	1,68
Pedra + Sorra + Malla 1	0,28	4,94	1,36
Pedra + Sorra + Malla 2	0,58	2,88	1,57
Pedra + Sorra + Malla 45º 1	1,01	4,20	1,55
Pedra + Sorra + Malla 45º 2	0,81	5,14	1,59

Com s'observa, el valor de la tensió màxima que suporta el formigó és inferior que el valor que està suportant el CFRP a la vall del perfil. En tractar-se de la zona més desfavorable de l'estructura, degut que està situada a l'extrem de la secció, es considera que el comportament de la biga segueix sent homogeni però amb l'inici d'aparició de fissures que es propaguen verticalment, empitjorant la transmissió d'esforços de l'estructura.

Cal destacar que la tensió que suporta la cresta de l'estructura és inferior a la tensió màxima a tracció del formigó, de manera que encara hi ha 40 mm de l'estructura que transmeten els esforços correctament.

Considerant que l'estructura encara treballa com un únic element, és possible aplicar el teorema de l'homogeneïtzació estructural, que permet relacionar les tensions a les quals està sotmesa la biga en funció del moment, la inèrcia i el centre de gravetat.

$$\sigma_h = \frac{M_x}{I_G} \cdot y \quad (4)$$

On σ_h és la tensió en MPa, M_x és el moment en N·mm, I_G és la inèrcia respecte al centre de gravetat mm^4 i y és l'alçada respecte a la coordenada del centre de gravetat de l'estructura.

Per calcular la inèrcia, es fa una simplificació del perfil de l'estructura (Figura 60). On es redueixen les crestes a rectangles que d'alçada 35 mm i amplada corresponent a l'amplada de la cresta afegint la meitat de distància horitzontal entre els vèrtexs dels plans inclinats.

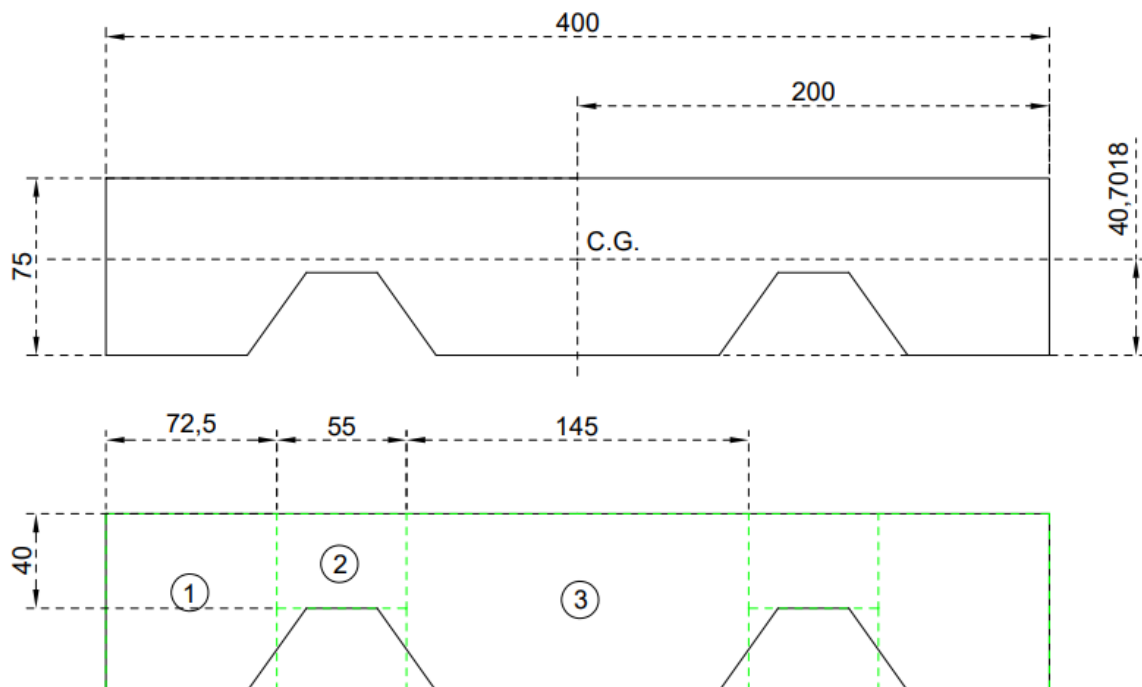


Figura 60. Simplificació pel càlcul de la inèrcia

El centre de gravetat de l'estructura ve donat gràcies al programa informàtic AutoCAD, un cop

es dimensiona el perfil de l'estructura i té coordenades (200; 40,7018) mm respecte al vèrtex inferior esquerre (origen de coordenades).

A continuació es calcula la inèrcia de les tres zones marcades a la Figura 60, aplicant el teorema de Steiner, ja que el centre de gravetat de cadascuna de les àrees no coincideix amb el de l'estructura.

$$I_0 = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 \quad (5)$$

$$I = I_0 + A \cdot r^2$$

$$I = 1,2 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$$

Amb la inèrcia calculada, és possible calcular analíticament la tensió que suporta l'estructura a la cresta i la vall del CFRP i comparar-ho amb la tensió obtinguda experimentalment.

Taula 15. Comparació del moment experimental i calculat

Espècimen	Experimental		Teorema de l'homogeneïtzació	
	Tensió de tracció a la cresta del CFRP (MPa)	Tensió de tracció a la vall del CFRP (MPa)	Tensió de tracció a la cresta del CFRP (MPa)	Tensió de tracció a la vall del CFRP (MPa)
Pedra 1	0,58	2,79	1,07	1,27
Pedra 2	0,24	1,12	1,08	1,28
Pedra + Malla 1	-	7,41	3,62	4,29
Pedra + Malla 2	1,63	6,66	3,66	4,34
Pedra + Sorra + Malla 1	0,28	4,94	2,35	2,79
Pedra + Sorra + Malla 2	0,58	2,88	1,61	1,92
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	1,01	4,20	3,11	3,69
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	0,81	5,14	2,72	3,23

S'observa que els valors de tensió a la cresta són superior segons el teorema de l'homogeneïtzació que durant l'experimentació mentre que a la vall, el teorema passa a tenir, en general, valors inferiors que els valors experimentals.

Això és a causa de que ja hi ha hagut microfissures al formigó que limiten l'aplicació del teorema, tot i això, es calcula l'error obtingut al punt crític de l'estructura, l'extrem inferior, com:

$$\varepsilon_R(\%) = \left| \frac{\sigma - \sigma_h}{\sigma_h} \right| \cdot 100 \quad (6)$$

On σ_h és el valor experimental obtingut en MPa, i σ és el valor obtingut pel teorema de l'homogeneïtzació (MPa).

Taula 16. Error entre el valor experimental i el calculat a la vall

Espècimen	Error (%)
Pedra 1	54,98
Pedra 2	14,55
Pedra + Malla 1	42,12
Pedra + Malla 2	34,81
Pedra + Sorra + Malla 1	43,51
Pedra + Sorra + Malla 2	33,41
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	12,05
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	37,18

Com a resultat de l'estudi de la linealitat segons el teorema de l'homogeneïtzació, l'error donat a l'extrem inferior de l'estructura oscil·la entre el 40%. Aquest error és un valor no negligible i s'estudien les diferents fonts que el podrien haver ocasionat.

Un dels motius que poden haver portat a aquests resultats ha estat l'equipament utilitzat durant l'experimentació, es parlen de deformacions de l'ordre de 10 μm , amb un equipament que és molt sensible i aspectes com la vibració durant l'experimentació o moviments de la connexió amb l'adquiridor de dades poden alterar la seva lectura. Per tant, es considera que la regió estudiada aporta uns valors massa baixos per a una correcta aproximació del comportament estructural real i per això, l'estudi del trencament, on les lectures ja canvien d'ordre de magnitud a 1000 μm , aporten una fiabilitat més gran.

S'arriba a la conclusió que el teorema de l'homogeneïtzació no es compleix durant la primera linealitat, on es suposava un comportament conjunt.

7.4.2. Punt de màxima càrrega

En aquest apartat s'analitza el comportament de l'estructura híbrida en el moment de màxima càrrega.

És un punt en el qual l'estructura deixa de treballar com un únic bloc, sinó que degut la fracturació del formigó, aquest treballa de manera independent de com treballa el CFRP. De manera que el CFRP en aquest punt continua treballant completament a tracció mentre que el formigó passa a treballar un cap de compressions situat a la part superior de l'estructura, considerant que l'aportació del formigó situat al centre és negligible a causa de la fracturació d'aquest.

Per veure si el comportament de l'estructura compleix les condicions esmentades al paràgraf anterior, es decideix calcular, de manera analítica, el moment al qual està sotmesa l'estructura.

Es calcularà la força resultant equivalent (R_T) que està suportant el CFRP i l'alçada d'on estaria aplicada aquesta força. Com l'estructura està sotmesa a un moment, la força de tracció que es troba al CFRP és la mateixa que la força de compressió a la qual està sotmesa el formigó.

Se suposa l'evolució del comportament del formigó que es reflecteix a la Figura 61, on gràcies al trencament del formigó, aquest ja no aporta cap tipus de resistència i dona lloc a una discontinuïtat en la transmissió d'esforços.

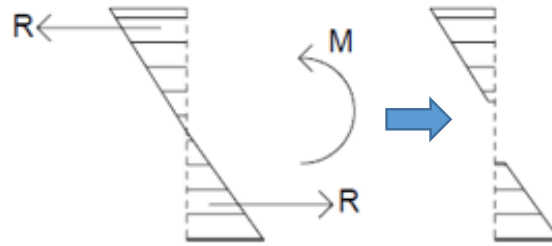


Figura 61. Suposició inicial de distribució d'esforços

Per simplificar, es decideix calcular per a la meitat de l'estructura, ja que és simètrica.



Figura 62. Secció amb la qual es fan els càlculs i definició de cota

Per efectuar aquest càlcul, primer es calcula les tensions a les quals està sotmès el CFRP en el moment de màxima càrrega amb l'expressió:

$$\sigma = E_{CFRP} \cdot \varepsilon \quad (7)$$

On σ és la tensió en MPa, E_{CFRP} és el mòdul de Young del CFRP, que és 45000 MPa, i ε és la deformació de la galga extensomètrica.

Amb les dimensions de l'estructura, és possible calcular la força que està suportant cada part del perfil de CFRP, de manera que la força que està resistint (R) és:

$$R = \sigma \cdot b \cdot h \quad (8)$$

On R és la força resultant (N), σ és la tensió (N/mm²), b és l'ample de l'aresta (mm) i h és el gruix del CFRP que és 1,5 mm.

Es fa la suma de res forces R_i de manera que s'obté la força resultant de tota l'estructura com:

$$R_T = 2 \cdot \sum_i R_i \quad (9)$$

De manera que s'aconsegueix una força equivalent a la que està suportant el CFRP, i ara es busca el centroide d'on estaria aplicada que dona el mateix moment al qual està sotmès.

Per trobar el centroide, respecte a la cota inferior de l'estructura com s'indica a la Figura 62, s'utilitza la següent expressió:

$$X_i = \frac{2 \cdot \sum_i R_i \cdot x_i}{R_T} \quad (10)$$

A la Taula 17 es pot veure el resultat d'aquest procediment.

Taula 17. Càlcul de la força R aplicada

Espècimen	Moment de trencament (N·m)	ϵ_s	ϵ_i	Tensió a la cresta del CFRP (MPa)	Tensió a la vall del CFRP (MPa)	R total de la biga (N)	Centroide força R inferior (Xi)
Pedra 1	5830,10	0,001003	0,004047	45,14	182,12	98942,72	13,24
Pedra 2	2436,93	0,000096	0,001142	4,32	51,39	26075,79	5,34
Pedra + Malla 1	6015,04	-	-	-	-	-	-
Pedra + Malla 2	10414,28	0,000885	0,004686	39,84	210,88	111843,99	3,09
Pedra + Sorra + Malla 1	2070,22	0,000057	0,000853	2,56	38,37	19324,81	2,60
Pedra + Sorra + Malla 2	3773,87	0,000552	0,001938	24,84	87,23	48094,54	3,44
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	10636,76	0,001327	0,0055630	59,73	250,34	135496,30	3,28
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	7141,80	0,000787	0,0036243	35,41	163,10	87509,59	3,20

A continuació es calcula el cap de compressions que suporta el formigó.

Primer s'ha de comprovar si el comportament del formigó segueix la suposició inicial (Figura 62). Per dur a terme aquesta comprovació es calcula la tensió a la qual està sotmesa el formigó considerant que la deformació que pateix el formigó segueix el comportament donat a partir de les deformacions de les galgues extensomètriques, expressió 11, per a una $x = 75$ mm.

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon_s - \epsilon_l}{0 - 35} \cdot x + \epsilon_l \quad (11)$$

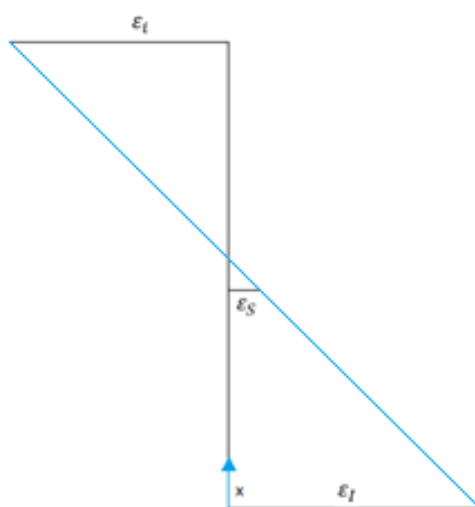


Figura 63. Determinació de la deformació màxima del formigó

Amb, un altre cop l'expressió X, es calcula la tensió de compressió que suporta el formigó a l'extrem superior de l'estructura i es compara amb la resistència a compressió del formigó, donada per l'escleròmetre.

En el cas que

$$\sigma_i = E_{formigó} \cdot \varepsilon_i < f_c \quad (12)$$

Llavors la suposició inicial es manté i es calcula l'amplada que tindrà aquesta distribució en forma de triangle, mitjançant la fórmula de la recta que uneix els dos extrems de l'estructura.

Per calcular el l'alçada d'aquest triangle, es calcula la integral entre aquest punt A i 75 mm, de l'àrea del triangle multiplicat per E_{CFRP} , que ha de tenir el mateix valor que R_T .

$$\int_A^{75} \left(\frac{400 \cdot x}{2} \right) \cdot E_{CFRP} dx = R_T \quad (13)$$

En l'altre cas, on

$$\sigma_i = E_{formigó} \cdot \varepsilon_i > f_c \quad (14)$$

La suposició inicial queda descartada, i passem a una segona suposició, on el cap de compressions té una distribució rectangular, on la tensió que suporta és la tensió màxima de compressió.

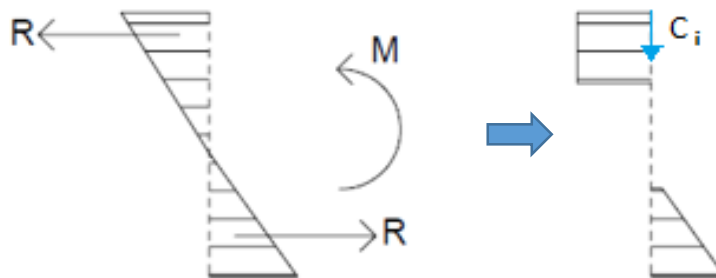


Figura 64. Segona suposició de la distribució d'esforços

Per trobar l'alçada d'aquest rectangle, es calcula que:

$$\sigma_{COMPRESSIÓ} \cdot 400mm \cdot x \text{ mm} = R_T \quad (15)$$

On $\sigma_{COMPRESSIÓ}$ està en MPa i R_T en N.

A la Taula 17 podeu veure que la tensió que suporta el formigó a la part superior de l'estructura és, en tots els casos, més elevada que la resistència a compressió del formigó calculada, de manera que tots els càlculs següents es basen en la segona suposició (Figura 64).

Taula 18. Càlcul del cap de compressions

Espècimens	Resistència a compressió (MPa)	Tensió de compressió a la part superior de l'estructura calculada (MPa)	Alçada cap de compressions (mm)	Centroide del cap de compressions (Ci)
Pedra 1	19,00	51,53	13,02	6,51
Pedra 2	20,75	53,85	3,14	1,57
Pedra + Malla 1	20,00	-	-	-
Pedra + Malla 2	22,60	56,20	12,37	6,19
Pedra + Sorra + Malla 1	16,40	47,87	2,95	1,47
Pedra + Sorra + Malla 2	20,40	53,39	5,89	2,95
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	20,00	52,87	16,94	8,47
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	20,90	54,04	10,47	5,23

El centroide del cap de compressions és des de la cota superior, com indica la Figura 64.

Finalment es calcula el moment que l'estructura està suportant, aplicant el moment al centroide d'una de les forces R.

$$M_A = d \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \cdot R_T \quad (16)$$

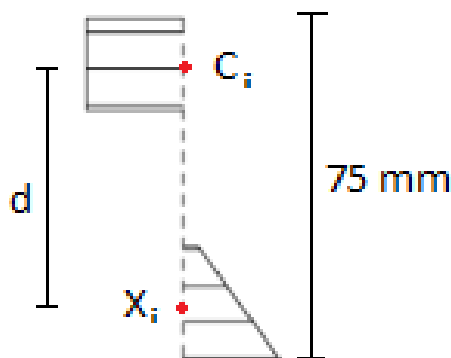


Figura 65. Significat de “d” a la fórmula de càlcul del moment

Obtenint així el moment teòric que està suportant l'estructura.

A la Taula 19 es compara el moment experimental de trencament amb el moment teòric que està suportant l'estructura.

Taula 19. Comparació del moment experimental i el calculat

Proveta	Moment experimental (N·m)	Moment teòric (N·m)	Error relatiu (%)
Pedra 1	5830,10	5466,18	6,24
Pedra 2	2436,93	1775,35	27,15
Pedra + Malla 1	6015,04	-	-
Pedra + Malla 2	10414,28	7350,67	29,42
Pedra + Sorra + Malla 1	2070,22	1370,66	33,79
Pedra + Sorra + Malla 2	3773,87	3299,75	12,56
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	10636,76	8570,70	19,42
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	7141,80	5825,36	18,43

A continuació es fa una comparació dels moments obtinguts.

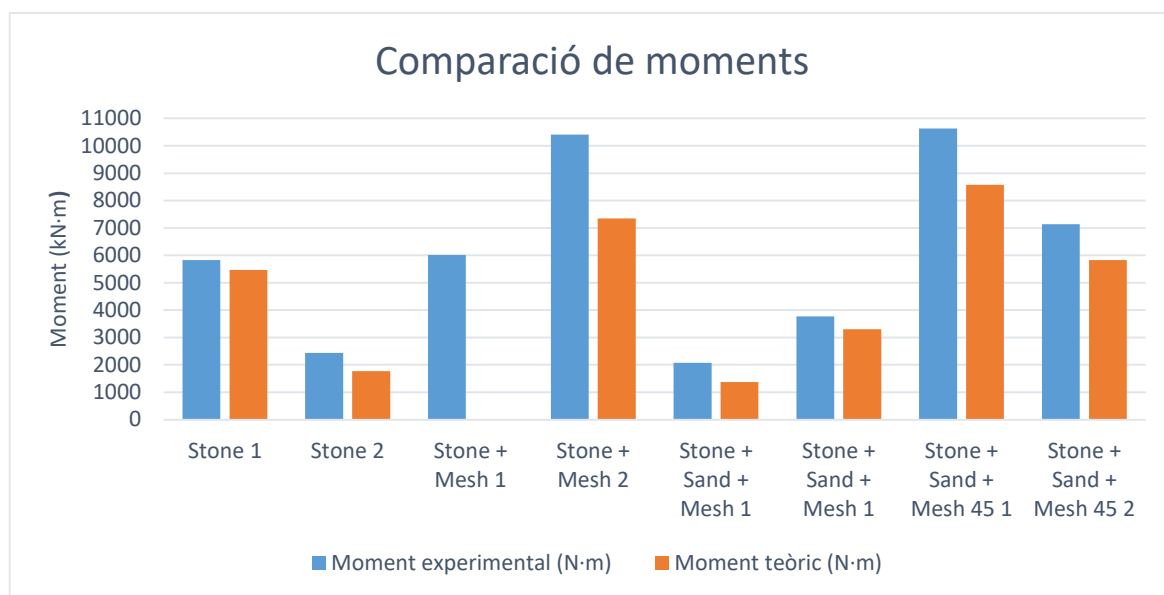


Figura 66. Comparació del moment calculat i l'experimental

S'observa que el moment teòric difereix del moment experimental amb diferències d'entre el 6 i 34%. Per valors inferiors al 20% es pot acceptar que hi ha una certa relació en la forma de treball real de l'estructura i la suposició que nosaltres hem enunciat, a més, tenint en compte que tot el procediment ha estat manual (amb totes les variacions que això provoca) considerem que l'experimentació compleix amb les suposicions enunciades i per tant totes les bigues han estat fabricades i assajades correctament.

7.4.3. Anàlisi del comportament de l'estructura en funció dels elements d'adherència

Amb les dades experimentals recollides, s'estudia la variació de la càrrega màxima en funció dels elements de millora de l'adherència utilitzats a cada cas.

Taula 20. Comparació dels assajos de flexió

Espècimen	Força màxima (kN)	Mètode de trencament
Pedra 1	11,66	Despreniment total del formigó del CFRP, aparició de vinclament al CFRP
Pedra 2	4,87	Despreniment entre el formigó i CFRP previ a l'assaig. Fissures verticals i despreniment total del formigó del CFRP. Vinclament al CFRP.
Pedra + Malla 1	12,03	Fissures verticals, trencament del CFRP
Pedra + Malla 2	20,82	Fissuració longitudinal. Trencament de la malla de fibra de vidre.
Pedra + Sorra + Malla 1	4,14	Defectes constructius. Fissures verticals que es propaguen longitudinalment. Trencament del CFRP.

Pedra + Sorra + Malla 2	7,54	Qualitat superficial inferior. Propagació d'esquerda verticalment. Despreniment total del formigó del CFRP. Lliscament.
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	21,27	Propagació de la fissura amb lleugera inclinació. Despreniment del formigó del CFRP.
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	14,28	Defectes constructius. Propagació de la fissura amb inclinació. Despreniment del formigó del CFRP.

A continuació es calcula per a cadascun dels espècimens el valor mitjà del seu cas.

Taula 21. Càlcul de la força mitjana

Espècimen	Força màxima (kN)	Força mitjana (kN)	Desviació estàndard (kN)
Pedra 1	11,66	8,26	4,79
Pedra 2	4,87		
Pedra + Malla 1	12,03	16,42	6,22
Pedra + Malla 2	20,82		
Pedra + Sorra + Malla 1	4,14	5,84	2,40
Pedra + Sorra + Malla 2	7,54		
Pedra + Sorra + Malla 45° 1	21,27	17,77	4,94
Pedra + Sorra + Malla 45° 2	14,28		

El següent gràfic comparatiu permetrà extreure conclusions sobre els elements d'adherència.

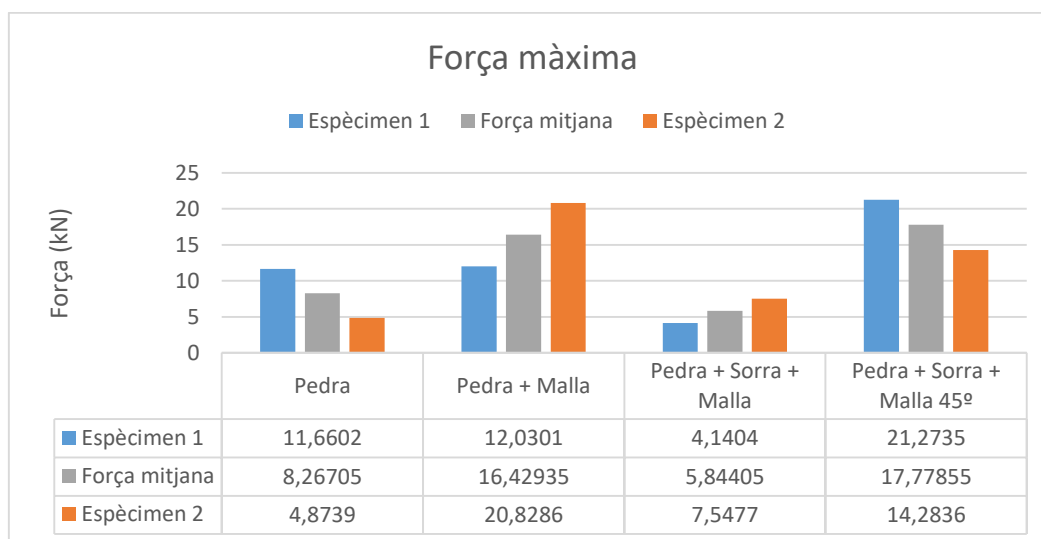


Figura 67. Comparativa de la força màxima dels casos

Com s'observa a la Figura 67, hi ha hagut variacions en el resultat de l'experimentació de dos espècimens pertanyents a un mateix cas, amb una diferència al voltant del 40-50%. Això dificulta a l'hora d'extreure conclusions de com afecten els elements d'adherència en el comportament estructural.

- Efecte de la pedra

S'observa que els espècimens amb pedra han resistit entre unes forces de 4 i 11 kN, de manera que s'agafa la seva mitjana com a base per dur a terme la comparació.

La pedra aporta rugositat a l'estructura, de manera que el formigó s'adhereix més fortament, donant més resistència a esforços. Tot i això la distribució d'aquestes, i la quantitat afecten el comportament final de l'estructura.

- Efecte de la malla

Per veure l'efecte que té la malla, sense tenir en compte la disposició d'aquesta, indica una millora en el comportament de l'estructura. Comparant els valors mitjans, dos de tres configuracions amb malla, donen valors molt superiors a l'obtingut només amb pedra. El comportament de l'estructura també varia lleugerament, donat que passa d'un comportament després de la càrrega màxima fràgil amb una disminució sobtada de força sense recuperació, a un comportament més dúctil on escara suporta una certa càrrega durant un període de temps.

Això indica, que tot i que el formigó que es troba a les valls de l'estructura presenti fissuracions, la malla dona una continuïtat entre el formigó que encara està en bon estat i el CFRP, aconseguint valors de resistència majors.

- Efecte de la sorra

Per veure l'efecte que té la sorra, es comparen els espècimens Pedra + Malla i Pedra + Sorra + Malla. A priori, els resultats dels espècimens que contenen sorra, presenten una resistència un 35% inferior als espècimens amb malla.

Si ara també es té en compte el cas de Pedra + Sorra + Malla 45°, que té una resistència mitjana semblant a la del cas Pedra + Malla, ens trobem que hi ha dues variacions en la configuració que dificulten apreciar l'efecte que té la sorra en els espècimens.

Tenint en compte que també la distribució i quantitat de sorra utilitzada a cada espècimen, tot i intentar que sigui la més homogènia possible, pot haver afectat al comportament de l'estructura afavorint localment el lliscament del formigó sobre el CFRP.

En conclusió, no es pot apreciar l'efecte de la sorra en la interacció entre CFRP i formigó amb els casos estudiats.

- Efecte de la inclinació de la malla

Comparant els espècimens que contenen malla, i negligint el cas de Pedra + Sorra + Malla a causa de defectes constructius.

Els dos casos presenten uns valors de força màxima molt semblants, variant únicament un

15% un cas respecte a l'altre. Aquesta variació té un valor reduït, negligible en molts casos ja que pot donar-se per diferències en el procés constructiu, que ha sigut completament manual i per tant amb l'error humà que això comporta, ja que el procés constructiu ha anat evolucionant durant la construcció dels espècimens. Donant que els espècimens de Pedra + Sorra + Malla 45° tenen una millor qualitat superficial gràcies al fet que s'han formigonat més homogèniament i s'han vibrat per eliminar restes d'aire.

Per aquest motiu, tampoc és possible determinar una variació en el comportament de l'estructura híbrida donat per la inclinació de la malla de vidre.

A la taula 22 suposa un breu resum de l'efecte que tenen cadascun dels elements d'adherència.

Taula 22. Resum comparatiu de l'efecte dels elements d'adherència

Cas	Comparació entre casos	Efecte
Pedra	-	No és comparable ja que no hi ha espècimens sense pedra. Per coneixement previ se sap que aporta rugositat i resistència a l'estructura
Malla	Pedra Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	Ha sigut necessari comparar tots els casos possibles, i s'arribà a la conclusió que la malla aporta una continuïtat en l'estructura, tot i tenir formigó esquerdat a les valls.
Sorra	Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	No és possible extreure una conclusió sobre l'efecte de la sorra.
Malla inclinada 45°	Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	No hi ha un canvi significatiu amb les dades obtingudes.

7.5. Anàlisi final dels elements d'adherència

A la taula 23 es recullen les conclusions extretes tant les donades per l'assaig de rasant com les que dona l'assaig de flexió.

Taula 23. Conclusions de l'efecte dels elements d'adherència als 2 assaigs

Cas	Flexió		Rasant	
	Comparació entre casos	Efecte	Comparació entre casos	Efecte
Pedra	-	No és possible comparar l'efecte de la pedra, ja que tots els espècimens porten.	Res Pedra	Augment de la rugositat que es transforma en una millor adherència del formigó.
Malla	Pedra Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	Ha sigut necessari comparar tots els casos possibles, i s'arribà a la conclusió que la malla aporta una continuïtat en l'estructura, tot i tenir formigó	Pedra Pedra + Malla	Canvi en el comportament de l'estructura, que passa a tenir un comportament dúctil, suportant càrregues majors durant un període més llarg.

		esquerdat a les valls.		
Sorra	Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	No és possible extreure una conclusió sobre l'efecte de la sorra.	Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla	No és possible extreure una conclusió sobre l'efecte de la sorra.
Malla inclinada 45°	Pedra + Malla Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	No hi ha un canvi significatiu amb les dades obtingudes.	Pedra + Sorra + Malla Pedra + Sorra + Malla 45°	No hi ha un canvi significatiu amb les dades obtingudes.

Es conclou que l'addició de pedres a l'estructura aporta rugositat i per tant una millor adherència del formigó gràcies a l'assaig de rasant. Es va decidir no construir espècimens de flexió sense pedra gràcies al coneixement previ, ja que l'adherència del formigó a superfícies llises és molt dolenta i per tant hagués suposat una inversió de temps i recursos innecessària.

L'addició de malla provoca un canvi en el comportament de l'estructura on es passa d'un comportament fràgil (disminució sobtada de càrrega sense recuperació) a un comportament més dúctil (disminució de la càrrega després de la càrrega màxima, però no a valors importants i manteniment dels mateixos durant un període de temps).

Els altres elements d'adherència, la sorra i la inclinació de la malla, no han donat resultats positius, que implicarien una millora en el comportament de l'estructura.

En el cas de la sorra no és possible extreure conclusions amb l'experimentació duta a terme ja que s'haguessin necessitat una varietat més gran d'espècimens per poder determinar el seu efecte.

En el cas de la inclinació de la malla, els resultats obtinguts han estat molt similars als resultats amb malla sense inclinació, cosa que indica que el fet d'inclinar la malla 45°, que en principi donava una distribució d'esforços a la malla de vidre més homogeni, dona un comportament similar a una inclinació de 0°. De manera que el fet d'inclinar o no la malla no vindria degut a necessitats de resistència estructurals, si no a altres com podria ser l'aprofitament de recursos.

8. Construcció del prototip

Per a comprovar que la tecnologia estudiada satisfà els requisits per la seva aplicació principal (dipòsit d'aigua) i les necessitats estructurals, es decideix la construcció d'un prototip de dipòsit d'aigua.

Es fa un esbós de les dimensions que el mateix ha de tenir, tenint en compte els màxims de la nostra producció, que es pot veure a la Figura 68.

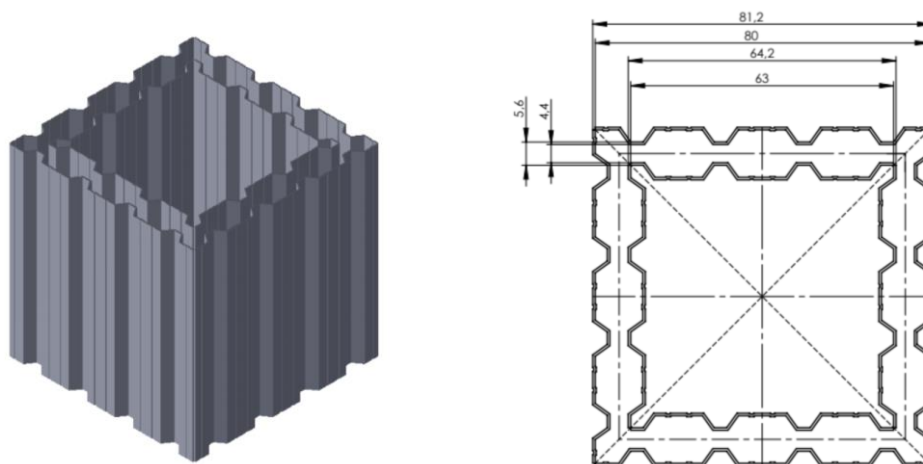


Figura 68. Disseny del prototip

A l'esquerra es pot veure una peça realitzada amb SolidWorks del prototip a construir i a la dreta es detallen les dimensions de cadascuna.

Es decideix que la paret exterior sigui de les dimensions màximes que ara mateix podem produir de CFRP que és de 80x80 cm, mentre que considerant que al deixar una separació de 4,4 cm entre les dues parets, les dimensions del CFRP interior serà de 64,2x80 cm.

Com que no va ser possible la finalització de la campanya experimental durant la selecció dels elements d'adherència que millors prestacions donen per la construcció del dipòsit, es considera que el cas Pedra + Sorra + Malla 45°, tot i que ara és conegut que no és possible determinar l'efecte de la sorra o de la inclinació de la malla.

El procés constructiu del CFRP és el mateix que l'explicat a l'apartat 4, d'on també s'especifica el condicionament dels espècimens.

Un cop condicionades totes les parets, aquestes han de ser unides dos a dos formant un angle de 90°. Per aconseguir-ho, es va utilitzar diferents elements de laboratori que formessin angles rectes de manera que gràcies a les dimensions d'aquests, sigues possible el recolzament de les parets.

A continuació, mitjançant una tira de fibra de carboni prèviament pesada, es prepara la barreja de resina i enduridor, de manera que té la mateixa massa que la fibra. L'objectiu és adherir aquesta tira de fibra de carboni de manera que uneixi les dues parets.

Es col·loca aproximadament la meitat de la barreja sobre el CFRP i s'adhereix la tira de fibra. A continuació s'aplica la resta de la barreja fent pressió perquè penetri el millor possible. Finalment es cobreix amb paper de forn i es col·loquen perfils metàl·lics perquè facin pressió durant les 48 h d'asseccament.



Figura 69. Parets del prototip en procés d'asseccament

Aquest procés s'ha de repetir 2 cops, tant per la part externa de les parets, com de la mateixa aresta internament perquè tingui una bona resistència.

Un cop unides les parets dos a dos, és necessari acabar d'unir-les per aconseguir recintes tancats seguint el mateix procediment.



Figura 70. Recinte tancat en procés d'asseccament

El pas següent és el formigonat del prototip.

Per poder formigonar, cal tenir un encofrat de fusta preparat, de dimensions 1x1 m i segellat amb silicona. Es va tenir en compte la forma de descàrrega del dipòsit, que és mitjançant una mànega que travessa una de les parets de l'encofrat.

A més, per millorar la unió entre les parets del prototip i la base, es decideix col·locar un armat d'acer, fent que sobresurti perpendicular a la base i estigui situat entre les parets del prototip.

La malla d'acer utilitzada és de diàmetre 5 mm i separació de 200 mm i ha estat possible el doblegament manual a 90°.

A l'hora de formigonar, és necessari deixar aproximadament 5 cm d'espai que seran on el col·locaran les parets de CFRP, per aquest motiu, s'ha de col·locar a la malla peces de poliestirè expandit de les dimensions necessàries.

Es col·loca la malla dintre de l'encofrat sobre unes peces que la mantingui separada del terra i és comença a formigonar.

Per la base s'ha necessitat de 10 sacs de formigó Fiasa, amb els seus corresponents 2,5L d'aigua per sac, que s'han preparat de 2 en 2 a la formigonera. S'emplena manualment l'encofrat assegurant que el formigó arriba a tota la superfície i que no queden espais sense formigonar i s'intenta que la base interior del dipòsit, tingui plans inclinats que desplacin l'aigua cap a la mànega.

Es col·loquen unes subjeccions metàl·liques a cada extrem de la base del prototip, parcialment coberts amb formigó, de manera que sigui possible el trasllat del dipòsit utilitzant el pont-grua. Finalment es cobreix amb paper fils per evitar lleugerament l'evaporació d'aigua.

Es deixa un període de presa i enduriment de 2 setmanes i es col·loquen i formigonen les parets.



Figura 71. Base formigonada

En el moment de l'entrega d'aquest treball, la base està en període de presa i enduriment i les parets encara no han estat formigonades.

Les parets seran formigonades el 25 de juny de 2019.

9. Impacte ambiental

Com s'especifica a l'abast del treball, no està inclòs el procediment detallat de tractament de residus.

Els residus més contaminants, com els productes químics i derivats del ciment, es col·loquen al punt de residus del laboratori i es tracten adequadament pel personal del LITEM.

Tot i això, es calcula les emissions donades per la utilització de l'equipament elèctric del laboratori per a la fabricació dels espècimens i assaigs. La Taula 24 mostra el consum de l'equipament així com el temps d'utilització.

Taula 24. Consum de l'equipament del laboratori

Equip	Consum (kW)	Temps d'utilització (h)	kWh
Caladora, Bosch PST 650	400,0	3,0	1200
Radial, Hitachi G125R4 (S)	730,0	0,5	365
Formigonera, Bigmat 130	700,0	5,0	3500
Ordinadors (2)	0,8	12,0	9,6
Monitor	0,6	8,0	4,8
Actuador MTS	6,0	8,0	48
Resta d'equipament	0,4	10,0	4
		TOTAL	5.131,4

Segons la Generalitat de Catalunya, concretament l'Oficina de Canvi Climàtic, tenint en compte l'energia consumida a la península i el mix energètic (amb dades del 2018), s'associen 321g CO₂ equivalent per kWh.

De manera que les emissions associades a la realització de l'estudi han estat:

$$5.131,4 \text{ kWh} \cdot \frac{321 \text{ g CO}_2 \text{ eq}}{1 \text{ kWh}} \cdot \frac{1 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}}{1000 \text{ g CO}_2 \text{ eq}} = 1.647,18 \text{ kg CO}_2 \text{ eq.}$$

Les emissions associades són de 1.647,18 kg de CO₂ equivalent.

10 . Pressupost

S'ha realitzat una estimació de la inversió que el Laboratori per a la Innovació Tecnològica d'Estructures i Materials (LITEM) i el Departament de Resistència de Materials de la universitat ha realitzat per poder dur a terme l'estudi.

El cost total calculat és de **SETZE MIL QUARANTA-NOU EUROS (16.049€)**.

Per veure amb més detall el desglossament de costos, consulti el document "Pressupost" adjunt a aquest treball.

11 . Conclusions

Durant aquest treball s'ha pogut comprovar el comportament d'estructures mixtes segons la interacció de les superfícies del CFRP i el formigó quan es sotmet a esforços de rasant i flexió.

S'ha plantejat un mètode de fabricació i preparació dels espècimens que ha donat lloc a un correcte desenvolupament dels assajos. El disseny dels espècimens i de la instal·lació dels assaigs han estat elements clau per aconseguir l'èxit de la campanya experimental, a partir de la qual s'extreuen les conclusions esmentades a continuació.

També s'ha realitzat una estimació dels recursos econòmics necessaris i de l'impacte ambiental que ha suposat l'estudi.

Les conclusions finals que es poden extreure són:

- És necessari que hi hagi elements que millorin el contacte de la superfície del CFRP amb el formigó.

S'ha vist que en el cas dels espècimens de rasant, l'addició de pedra augmenta la resistència a tallant, en el cas de valors mitjans lleugerament però, suposant que en l'industrialitzar el procés aquest tingués un acabat més proper a l'espècimen res 2, l'augment de resistència és 10 vegades més gran.

- L'addició de malla provoca un canvi en el comportament de l'estructura, que passa d'un comportament fràgil a un comportament més dúctil.

Al punt de càrrega màxima, hi ha una caiguda sobtada de la força, però l'addició de la malla provoca que aquesta caiguda sigui més reduïda, i que l'estructura suporti una força més elevada durant més temps un cop passat el trencament. Aquest comportament indica que l'estructura tindrà certa resistència durant un període de temps, on el trencament podria ser detectat.

- L'addició de la malla provoca un augment de la resistència de l'estructura.

Els resultats tant de rasant com de flexió han millorat amb l'addició de la malla. No únicament pel canvi en el comportament estructural, sinó en la càrrega màxima que suporta que arriba a ser el doble dels espècimens que només porten pedra.

- No s'observen millores en resistència als esforços amb l'addició de sorra als plans inclinats.

Tant a rasant com a flexió, l'addició de sorra ha donat resultats similars o molt inferior als espècimens que porten pedra i malla. Ja que només hi ha hagut dos espècimens de cada tipus, no és possible determinar quin dels dos és el que s'aproxima al comportament real que tindria un espècimen de pedra, sorra i malla. Per aquest motiu, no és possible determinar l'efecte de la sorra als espècimens.

- L'efecte de la inclinació de la malla de fibra de vidre a 45° no és apreciable.

Els espècimens amb malla inclinada, han donat resultats de resistència similars als que porten

mallat recta. Un altre cop, per causa de la diferència en els resultats de dos espècimens del mateix cas i el fet que només ha sigut possible la fabricació de dos espècimens per cas per assolir la totalitat de la campanya en el temps establert, no és possible determinar quin dels dos resultats s'aproxima al comportament del cas, ja que hi ha molts elements de variació, i per tant no és possible concloure en l'efecte que té la inclinació de la mallat sobre els espècimens.

- No és possible aproximar pel teorema de l'homogeneïtzació el comportament de l'estructura a l'inici de l'assaig de flexió.

El teorema de l'homogeneïtzació permet relacionar la tensió a la qual està sotmesa una estructura segons la geometria de la secció, la inèrcia i el moment aplicat. Els errors obtinguts són d'aproximadament el 40%, valor no negligible i per tant conclou fermament que aquesta aproximació no simula el comportament real.

- L'aproximació de la distribució d'esforços i el moment aplicat en el punt de càrrega màxima dona una relació acceptable.

L'aproximació dels esforços com una distribució trapezoidal al CFRP i un cap de compressions rectangular on l'amplada és el valor de la resistència a compressió, dona errors entre el 6 i 34%. Per valors inferiors al 20%, que són 4 dels 7 espècimens, es considera que l'aproximació és correcta. El valor experimental sempre és superior al valor teòric.

- La tecnologia desenvolupada permet la construcció d'estructures amb aplicacions industrials.

La construcció del prototip ha estat possible tenint en compte la secció seleccionada de l'estructura. Amb els recursos disponibles, s'ha demostrat que és possible la construcció d'un recinte tancat capaç de resistir les necessitats estructurals de la seva aplicació, que en aquest cas és la resistència a l'esforç al qual l'aigua sotmet a les parets del prototip.

12. Següents passos

Tot i haver complert els objectius establerts per a aquest estudi, en el cas que es volgués aprofundir més a la recerca en aquest àmbit, hi ha certes recomanacions que considero oportunes donar.

- Caracterització del CFRP: Durant l'estudi no es va plantejar fer la caracterització del CFRP i per aquest motiu es van agafar dades a partir de la bibliografia. Considero necessari dur a terme la caracterització de cadascun dels materials que conformen l'estructura per poder determinar el seu comportament correctament.
- La fabricació d'espècimens més homogenis: els materials amb el que es treballa són materials heterogenis, els quals és complicat imitar per a cadascun dels espècimens. Hi ha hagut una variació molt gran entre l'acabat del CFRP i formigó dels espècimens inicials als últims a fabricar, que també influeix en la resistència del mateix, dificultant la determinació de l'efecte que cadascun dels elements de nexa té al comportament de l'estructura.
- La fabricació de més espècimens per a cada cas: S'ha vist durant l'experimentació que per un mateix cas es poden donar dos resultats molt diferents. Tenint només dos espècimens és complicat determinar quin és el que té un comportament més pròxim al real que té una estructura del tipus de cas de nexa. Es recomana la fabricació de, com a mínim, 3 espècimens per a cada cas. D'aquesta manera és possible l'exclusió d'un espècimen en cas que el seu comportament sigui considerablement diferent als altres dos del seu mateix cas de nexa.
- Millorar l'aplicació de la força de l'assaig de rasant: Aconseguir aplicar una càrrega a desplaçament constant facilitaria el processament de les dades.
- Millorar la fixació del CFRP a l'assaig de rasant: Aconseguint una correcta fixació del CFRP al terra, evitant la rotació que es donava a l'assajar els espècimens de Pedra + Sorra + Malla 45° es podria tenir

13. Bibliografía

A aquest apartat es citen totes les fonts utilitzades per obtenir la informació necessària per dur a terme aquest estudi.

- [1]. M. A. Pérez. (2014) *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. Omnia Publisher SL. [En línia] (<http://www.cimne.com/compdesmat/cvdata/cntr1/dtos/img/mdia/Downloads/Aplicaciones-avanzadas-de-los-materiales-compuestos-en-la-obra-civil-y-la-edificacion.pdf>)
Consultat el 20/02/2019.
- [2]. Molina, M., Oller, S., Barbat, A., & Martínez, X. (2010) *Análisis numérico de estructuras de hormigón reforzadas con FRP por medio de la teoría de mezclas serie/paralelo*. Revista Internacional de Métodos Numéricos Cálculo y Diseño en Ingeniería 26, 2 ,p.135–155.
- [3]. Engineerstandpoint.blogspot.com. (2012). *Engineer's Standpoint: History of Reinforced Concrete Design*. [En línia] (<http://engineerstandpoint.blogspot.com/2012/11/history-of-reinforced-concrete-design.html>)
Consultat el 23/02/2019.
- [4]. Iglesias, M. and Mirambell, E. (2009). *Proyecto y cálculo de forjados mixtos con chapa nervada*. Tesi d'especialitat. Universitat Politècnica de Catalunya. [En línia] (<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8513/00.pdf>)
Consultat el 28/02/2019.
- [5]. Pallisser, j. (2015). *DISSENY I CÀLCUL D'UNA NAU INDUSTRIAL PER A LA FABRICACIÓ DE MATERIALS AÏLLANTS*. Treball de Fi de Grau. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [6]. Tatasteelconstruction.com. (2019). *Composite Floor Decks, Composite Decking | Tata Steel*. [En línia] (https://www.tatasteelconstruction.com/en_GB/Products/structural-buildings-and-bridges/Composite-floor-deck)
Consultat el 15/04/2019.
- [7]. Dan, D., Fabian, A., & Stoian, V. (2011). Theoretical and experimental study on composite steel–concrete shear walls with vertical steel encased profiles. *Journal Of Constructional Steel Research*, 67(5), 800-813.
- [8]. Raithby, K. (1982). Strengthening of concrete bridge decks with epoxy-bonded steel plates. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 2(2), 115-118.
- [9]. Su, R., & Zhu, Y. (2005). Experimental and numerical studies of external steel plate

strengthened reinforced concrete coupling beams. *Engineering Structures*, 27(10), 1537-1550.

- [10]. Elmatzoglou, M., & Avdelas, A. (2017). Numerical Modelling of Double-Steel Plate Composite Shear Walls. *Computation*, 5(4), 12.
- [11]. Remennikov, A., Gan, E., Ngo, T. and Netherton, M. (2019). The development and ballistic performance of protective steel-concrete composite barriers against hypervelocity impacts by explosively formed projectiles. *Composite Structures*, 207, pp.625-644.
- [12]. Liu, Y., Zwingmann, B., & Schlaich, M. (2015). Carbon Fiber Reinforced Polymer for Cable Structures—A Review. *Polymers*, 7(10), 2078-2099.
- [13]. Tarek Alkhrdaji, P. (2015). STRUCTURE magazine | Strengthening of Concrete Structures Using FRP Composites. [En línia] Structuremag.org.

(<https://www.structuremag.org/?p=8643>)

Consultat el 05/03/019.

- [14]. Heffernan, P. and Erki, M. (2004). Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Plastic Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 8(2), pp.132-140.
- [15]. Abduljalil, B. (2014). Shear Resistance Of Reinforced Concrete Deep Beams With Opening Strengthened By CFRP Strips. *Journal of Engineering and Development*, pp.14-32.
- [16]. Shadravan, B. and Tehrani, F. (2017). A Review of Direct Shear Testing Configurations for Bond between Fiber-Reinforced Polymer Sheets on Concrete and Masonry Substrates. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, pp.740 - 751.
- [17]. Graham, M. (2015). *Testing Series Part 1: The Problem, The Plan, and The Prototype*. [En línia] EngineerDog.

(<https://engineerdog.com/2015/03/26/3d-printing-materials-testing-series-part-1-the-problem-the-plan-and-the-prototype/>)

Consultat el 10/03/2019.

- [18]. B.V., X. (2017). *Newsletter: Fracture strength of thin wafers and die*. [online] XYZTEC.COM. [En línia]

(<https://www.xyztec.com/en/news/newsletter-30/Fracture-strength-of-thin-wafers-and-die>)

Consultat el 10/03/2019.

- [19]. CIVIL READ. (2019). *Schmidt hammer test or Rebound Hammer test of Concrete*. [En línia] (<https://civilread.com/concrete-rebound-hammer-test/>)

Consultat el 28/02/2019

- [20]. Castañeda, A., Howland, J., Corvo, F. and Pérez, T. (2013). Corrosion of steel reinforced concrete in the tropical coastal atmosphere of Havana City, Cuba. *Química Nova*, 36(2), pp.220-229.
- [21]. Rahmani, H., Najaf, S., Ashori, A., & Golriz, M. (2015). Elastic Properties of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Composites. *Polymers And Polymer Composites*, 23(7), 475-482. doi: 10.1177/096739111502300706
- [22]. Asociación Española de Normalización y Certificación. (2009). *Instrucción de hormigón estructural EHE-08*. Madrid: AENOR.